Henry Margenau

La naturaleza de la realidad física

Una filosofía de la Física moderna

ESTRUCTURA Y FUNCION

EDITORIAL TECNOS - MADRID

LA NATURALEZA DE LA REALIDAD FISICA

Considerando superadas ya por la ciencia las actitudes del realismo acrítico, del simple operacionismo y del empirismo radical, el autor de esta obra, físico eminente y profesor de Filosofía Natural en la Universidad de Yale, tras analizar la experiencia en su conjunto —no tan sólo el conocimiento empírico— y suministrar un cuadro completo de los problemas del conocimento filosófico en combinación con los más recientes avances de las ciencias físicas, da cima a una epistemología de la ciencia en la que, si no faltan elementos clásicos, como el idealismo kantiano, y modernos, como el positivismo actual, queda instaurado un sistema propio, no adscrito a ninguna escuela de pensamiento, que permite contemplar y abarcar tanto la ciencia clásica como la moderna.

De indudable utilidad para toda persona interesada en el tema de la filosofía de la ciencia, accesible incluso para el lector no especializado, LA NATURALEZA DE LA REALIDAD FÍSICA reviste singular interés para el filósofo que desee una autorizada y selecta panorámica de los progresos realizados por la física moderna, así como para el físico, que encontrará en este libro la necesaria reflexión sobre el resultado de sus investigaciones.

ESTRUCTURA Y FUNCION

El porvenir actual de la Ciencia

Colección dirigida por ENRIQUE TIERNO GALVAN

1. QUENTIN GIBSON: *La lógica de la investigación social.*
2. M. F. ASHLEY MONTAGU: *La dirección del desarrollo humano* (2.ª ed.).
3. GUSTAV BERGMANN: *Filosofía de la ciencia.*
4. CHRISTIAN BAY: *La estructura de la libertad.*
5. ERNEST NAGEL: *La lógica sin metafísica.*
6. DAVID HILBERT y WILHELM ACKERMANN: *Elementos de lógica teórica* (2.ª ed.).
7. VERNON VAN DYKE: *Ciencia política; Un análisis filosófico.*
8. KARL R. POPPER: *La lógica de la investigación científica* (2.ª ed.).
9. R. M. MARTIN: *Verdad y denotación.*
10. ERNEST GELLNER: *Palabras y cosas.*
11. C. D. BROAD: *El pensamiento científico.*
12. JOHN HOSPERS: *La conducta humana.*
13. ARTHUR PAP: *Teoría analítica del conocimiento.*
14. T. C. SCHELLING: *La estrategia del conflicto.*
15. RICHARD B. BRAITHWAITE: *La explicación científica.*
16. MILIC CAPEK: *El impacto filosófico de la física contemporánea.*
17. ROS ASHBY: *Proyecto para un cerebro.*
18. HANS REICHENBACH: *Moderna filosofía de la ciencia.*
19. GEORGE POLYA: *Matemáticas y razonamiento plausible.*
20. GEORGE L. S. SHACKLE: *Decisión, orden y tiempo.*
21. D. M. ARMSTRONG: *La percepción y el mundo físico.*
22. ERNEST NAGEL: *Razón soberana.*
23. MAX BLACK: *Modelos y metáforas.*
24. HASKELL B. CURRY & ROBERT FEYS: *Lógica combinatoria.*
25. LUDWIG WITTGENSTEIN: *Los cuadernos azul y marrón.*
26. ABRAHAM EDEL: *El método en la teoría ética.*
27. ALFRED LANDÉ: *Nuevos fundamentos de la mecánica cuántica.*
28. JEAN LADRIÈRE: *Limitaciones internas de los formalismos.*
29. N. WIENER y J. P. SCHADÉ: *Sobre modelos de los nervios, el cerebro y la memoria.*
30. G. H. VON WRIGHT: *Norma y acción.* Una investigación lógica.
31. E. NAGEL y J. R. NEWMAN: *El teorema de Gödel.*

LA NATURALEZA
DE LA
REALIDAD FISICA

ESTRUCTURA Y FUNCION
EL PORVENIR ACTUAL DE LA CIENCIA

Henry Margenau

LA NATURALEZA DE LA REALIDAD FISICA

Una filosofía de la Física moderna

EDITORIAL TECNOS

MADRID

Los derechos para la versión castellana de la obra
THE NATURE OF PHYSICAL REALITY: A PHILOSOPHY
OF MODERN PHYSICS
publicada por
McGRAW-HILL BOOK COMPANY, New York,
Copyright, 1950, by the McGraw-Hill Book Company,
son propiedad de
EDITORIAL TECNOS, S. A.

Traducción por
ADOLFO MARTIN

© EDITORIAL TECNOS, S. A., 1970
O'Donnell, 27 - Tel. 226 29 23 - Madrid-9
Depósito Legal: M. 21813 - 1970

Printed in Spain. Impreso en España por Selecciones Gráficas (Ediciones). P.° de la Dirección, 52.

INDICE GENERAL

PREFACIO ... *Pág.* 11

I. ESTUDIO PRELIMINAR DE LA REALIDAD ... 13
- Observaciones previas ... 13
- La permanencia ... 15
- El aspecto de cosa ... 16
- La eficacia ... 20
- Resumen ... 21

II. LAS MANERAS DE LLEGAR A LA REALIDAD ... 23
- La metafísica de la ciencia natural ... 23
- Ciencias frente a humanidades ... 26
- La clasificación de las ciencias ... 28
- Marxismo y ciencia ... 30
- La clasificación de Comte ... 33
- Correlación frente a explicación teorética ... 34
- Resumen ... 38

III. ¿QUÉ ES LO INMEDIATAMENTE DADO? ... 41
- El científico como espectador de lo dado ... 41
- La concepción mecanicista de la Naturaleza ... 42
- Es preciso reparar el mecanismo ... 43
- El mecanismo falla completamente ... 46
- La teoría de los conceptos auxiliares ... 51
- Lo dado es interior a la experiencia, no exterior a ella ... 52
- Los datos de los sentidos ... 54
- Resumen ... 57

IV. EL APARTAMIENTO DE LO INMEDIATO; LAS CONSTRUCCIONES INTERPRETATIVAS ... 59
- La continuidad entre lo espontáneo y lo reflexivo ... 59
- La bruma de lo inmediatamente dado ... 61
- El paso desde los datos hasta el conocimiento metódico ... 62
- Las reglas de correspondencia ... 64
- Las construcciones interpretativas ... 71
- Resumen ... 75

V. LOS REQUISITOS METAFÍSICOS DE LAS CONSTRUCCIONES INTERPRETATIVAS ... 77
- Las construcciones interpretativas no están totalmente determinadas por la percepción ... 77
- Ciencia y metafísica ... 80
- El requisito de fertilidad lógica (A) ... 83
- El requisito de las vinculaciones múltiples (B) ... 85
- Los requisitos de permanencia y estabilidad (C) ... 89
- El requisito de la ampliabilidad de las construcciones interpretativas (D) ... 91
- El requisito de causalidad (E) ... 94
- La sencillez y la elegancia (F) ... 96
- Resumen ... 99

VI. La confirmación empírica ... 101
El circuito de la confirmación empírica ... 101
El significado de la concordancia entre teoría y observación ... 105
Las medidas de precisión ... 108
La curva normal de errores ... 111
¿Pueden reducirse indefinidamente los errores de observación? ... 113
Resumen ... 118

VII. El espacio y el tiempo ... 120
Espacio, tiempo y realidad ... 120
La independencia del espacio respecto de los objetos ... 122
Las cualidades espaciales y temporales de la percepción ... 125
La medición del espacio ... 127
La medición del tiempo ... 132
El espacio y el tiempo conceptuales ... 134
El espacio y el tiempo en Kant ... 138
Einstein y Minkowski ... 143
El espacio absoluto frente al relacional. Las dimensiones ... 146
La continuidad del espacio y el tiempo ... 148
La flecha del tiempo ... 152
¿Son infinitos el espacio y el tiempo? ... 155
Resumen ... 157

VIII. Sistemas, observables y estados ... 159
La ciencia, ¿describe o explica? ... 159
El entramado de la descripción física ... 162
Resumen ... 167

IX. La física de los sistemas discretos ... 169
El método de la mecánica ... 169
La mecánica de Newton ... 171
Los principios integrales ... 174
Los sistemas de muchas partículas ... 177
La mecánica de los cuerpos rígidos ... 181
Resumen ... 182

X. La física de los medios continuos ... 183
La mecánica de los medios continuos ... 183
La teoría del campo electromagnético ... 187
Resumen ... 193

XI. La termodinámica ... 194
El método de la termodinámica ... 194
Los principios de la termodinámica ... 198
Mirando hacia atrás y hacia delante ... 203
Resumen ... 204

XII. El papel de las definiciones en la ciencia ... 206
Sobre la unicidad de las definiciones ... 206
La definición de fuerza ... 208
El enfoque del empirista ... 211
Las definiciones constitutivas frente a las epistémicas ... 216
Breve revisión de las definiciones epistémicas y constitutivas en la física y las matemáticas ... 219
La interacción entre las definiciones y los *a priori* ... 222
Resumen ... 225

XIII. La probabilidad ... 227
Probabilidad y lógica inductiva ... 227
La probabilidad es una cantidad física mensurable ... 231
Dos modos de definir la probabilidad ... 233
La regla de Laplace y sus deficiencias ... 236

La definición frecuencial y sus deficiencias ... 239
La concepción sintética ... 243
Resumen ... 245

XIV. La mecánica estadística ... 247
El problema de la explicación en la mecánica estadística ... 247
La teoría de Gibbs ... 251
Otros tipos de mecánica estadística ... 255
Estadística e ignorancia ... 258
Resumen ... 262

XV. Un primer esbozo de la realidad ... 263
Las realidades no físicas ... 263
Definimos la realidad ... 266
La realidad de los datos; los otros yoes ... 271
El mundo real ... 273
Resumen ... 278

XVI. El fracaso de los modelos físicos ... 280
La crisis de la mecánica clásica ... 280
El dualismo entre ondas y partículas ... 285
La naturaleza fundamental de las partículas elementales y la bruma de lo inmediatamente dado ... 291
¿Dónde está el electrón? ... 294
Resumen ... 297

XVII. Ideas básicas de la mecánica cuántica ... 299
Orientación ... 299
Operadores, funciones propias y valores propios ... 300
Axioma 1. Observables y operadores ... 303
Axioma 2. Estados y funciones ... 306
Axioma 3. El significado empírico de los valores propios ... 307
Axioma 4. El significado empírico de los estados y de los estados propios ... 311
Generalizaciones ... 316
Axioma 5. La dinámica cuántica ... 318
Resumen ... 320

XVIII. Incertidumbre y mediciones ... 323
El principio de incertidumbre ... 323
Casos límite del principio de incertidumbre ... 328
Ejemplos de incertidumbre ... 329
¿Qué es una medición? ... 335
La compatibilidad de las mediciones ... 340
Mediciones y estados propios ... 341
La teoría de Von Neumann de mezclas y casos puros ... 344
La mecánica clásica como forma límite de la mecánica cuántica. 346
Resumen ... 349

XIX. La causalidad ... 351
Las causas totales y parciales ... 351
Historia del problema de la causalidad ... 355
El demonio de Laplace ... 357
Causalidad y predicción ... 360
La causalidad como invariabilidad temporal de las leyes ... 362
La necesidad causal, etc. ... 365
La causalidad, las leyes de conservación y la relatividad ... 368
La causalidad en otras disciplinas ... 370
La causación en la biología ... 373
La causalidad en la física cuántica; la complementariedad ... 375
Causa y finalidad ... 379
Resumen ... 381

XX. El principio de exclusión ... 384
Su origen y función ... 384
Enunciado del principio de exclusión ... 385
Formulación matemática ... 388
Consecuencias del principio de exclusión; las cuasifuerzas ... 390
Generalizaciones y limitaciones ... 393
La "identidad" de los electrones ... 395
La exclusión y la organización biológica ... 396
Resumen ... 400

XXI. Los contornos de la realidad ... 402
Recapitulación ... 402
La realidad en la física cuántica ... 406
¿Por qué no un simple realismo? ... 407
Otras clases de realidad ... 410
La realidad física y los valores ... 415

Indice de autores ... 421

Indice de materias ... 425

PREFACIO

Hemos escrito este libro con el profundo convencimiento de que las personas dedicadas al cultivo de la teoría física pueden sacar provecho de la reflexión filosófica acerca del significado de sus investigaciones, y de que la física moderna es portadora de un mensaje para la filosofía. Esta última afirmación no es, ciertamente, nueva, y al hacerla suya el autor sube con cierta timidez a un palenque que rebosa de gladiadores de primera fila. Debe, por tanto, declarar su reto: éste consiste en que abriga la creencia de que las actitudes del realismo acrítico, del operacionismo escueto y del empirismo radical, que están presentes en la mayoría de los debates y en gran parte del pensamiento sobre temas científicos, se hallan ya superadas y en desarmonía con los nuevos aspectos que presenta la física contemporánea. Comenzará, pues, analizando toda *experiencia, no sólo la periférica parte denominada* conocimiento empírico *en sentido estricto; y finalizará en una epistemología que se halla en consonancia tanto con la física clásica como con la teoría de los* cuantos, *una filosofía de la ciencia que permite considerar a esta nueva disciplina tenida por heterodoxa, a este semillero de paradojas, como una culminación de métodos largo tiempo presentes en la ciencia natural.*

Vamos a presentar aquí breves explicaciones de determinados aspectos susceptibles de provocar objeciones en el lector filosófico: tal vez parezca que los primeros capítulos del libro son innecesariamente discursivos y que versan sobre problemas filosóficos tradicionales cuyo planteamiento no es de la total incumbencia de los científicos. Hemos incluído estos capítulos, sin embargo, no sólo porque preparan el camino al lector no filosófico sino, sobre todo, porque las secciones finales del libro afirmarán que las cuestiones "tradicionales" tienen mayor relevancia para la ciencia de lo que comúnmente se cree. No obstante, la omisión de los tres primeros capítulos no impide la comprensión de los principales extremos tratados en el libro.

Preciso es dar también una explicación del uso ocasional de las matemáticas, por más que se trate de un uso muy limitado. No extraeremos ninguna conclusión importante de argumentos puramente matemáticos, y los lectores que no quieran detenerse en detalles pueden seguir las líneas principales del razonamiento; pero la claridad que surge de la comprensión matemática de ciertos puntos ofrece unas ventajas tan abrumadoras, comparada con el entender cualitativo proporcionado por los

medios verbales, que no hemos querido renunciar totalmente a ella. Hemos adoptado, por tanto, una solución de compromiso: todos los argumentos matemáticos han quedado reducidos a una forma en que pueda seguirlos el lector razonablemente versado en el cálculo infinitesimal ordinario (sin que sea preciso un dominio absoluto). Esta simplificación solamente ha supuesto determinadas restricciones sobre el tema a tratar, y no ha exigido sacrificio alguno de la precisión y rigor necesarios.

Es posible que el físico encuentre afirmaciones controvertibles, incluso levemente escandalosas. Pero dudo que se llame a engaño por esto, ya que sus propios descubrimientos han sido en los últimos tiempos lo suficientemente asombrosos como para hacerle bastante inmune a escándalos provenientes de consideraciones filosóficas.

La mayoría de los temas aquí tratados interensarán a toda persona de inquietudes fundamentales que sienta también interés por la ciencia. Considero probable que le sea estimulante y, por consiguiente, tal vez provechoso el presente enfoque de las materias que aquí estudiamos, aun cuando pueda disentir en algunos detalles concretos.

Existe en América una notable escasez de libros serios que versen sobre la metodología de las ciencias naturales exactas, así como de cursos sobre estos temas, y espero que el presente volumen pueda llenar en parte este vacío. Si se utiliza como libro de texto (todas cuyas partes han de ser digeridas perfectamente) exigirá con toda probabilidad cierta base de preparación previa, tanto en física como en filosofía. Es plausible suponer que los alumnos de los colleges *norteamericanos que se estén especializando en uno de estos campos y hayan seguido uno o dos cursos del otro puedan utilizar el libro con provecho; con objeto de atender a lo que ellos necesitan insertamos al final de cada capítulo una lista de obras que versan sobre las materias tratadas en él, obras que han sido seleccionadas con absoluta imparcialidad (de modo que todas las listas contienen referencias en las que se presentan puntos de vista completamente distintos del mío).*

Evidentemente, he contraído una deuda general de gratitud con muchos autores, pero más específicamente con mis colegas del Departamento de Filosofía de la Universidad de Yale por haber suscitado en mí un auténtico interés por sus problemas y por guiarme paciente y comprensivamente hacia numerosos tesoros bibliográficos de su especialidad. El profesor HAROLD S. BURR, *del Departamento de Anatomía, ha tenido la gentileza de leer el manuscrito completo y de asesorarme con sus consejos y sus críticas durante su preparación; y el profesor* F. S. C. NORTHROP, *autor de muy valiosos libros sobre temas similares, me ha hecho el honor de leer las pruebas y de sugerirse determinadas mejoras. Quiero, finalmente, hacer constar mi agradecimiento a* ADOLF GRÜNBAUM, *que leyó el primer borrador y propuso numerosas modificaciones de la presentación.*

New Haven de Connecticut.

H. M.

CAPITULO I

ESTUDIO PRELIMINAR DE LA REALIDAD

1.1. Observaciones previas

Llegar a conocer principios generales por medio de una exposición abstracta es un camino posible, pero no expedito. Parece más juicioso acercarse a ellos con un amplio pero bien definido proyecto a la vista, un proyecto que exija una continua y variada aplicación de los principios que hayan de estudiarse, y que pueda servir a la vez como objetivo y como ejemplificación. Los principios de que nos ocupamos en este libro forman el tema conocido con el nombre de *epistemología* de la ciencia, o, más simplemente, de filosofía de la física y de las disciplinas con ella relacionadas; en cuanto al proyecto elegido como objetivo específico de nuestra investigación, es el de determinar el significado de la *realidad física.*

No comenzamos con un conjunto fijo de ideas. En los primeros capítulos del libro haremos un intento de condensar la vaga e informe matriz de conceptos populares y semicientíficos que rodean el problema de la realidad en materias cada vez más definidas y en cuestiones progresivamente específicas; y la terminología será al principio difusa, pero irá adquiriendo perfiles tajantes conforme avancemos. El filósofo puede, por lo tanto, sin perjuicio de la comprensión (y, tal vez, para evitarse un rato de aburrimiento), pasar por alto los dos o tres primeros capítulos del libro. En el presente queremos centrar la atención sobre tres componentes, bastante obvios, de lo real: la *permanencia,* el *aspecto de cosa* y la *eficacia.*

La búsqueda de lo real inspira la mayoría de los esfuerzos de nuestro linaje, llena al científico de curiosidad y de un ardiente deseo de nuevas aventuras, dispone la mente del filósofo para la contemplación de pretéritas cumbres del pensamiento, conduce al historiador a escudriñar los hechos del hombre de que tengamos noticia en busca de pautas constantes; relumbra en la exuberancia del místico y se congela hasta el dogmatismo en el confiado conocimiento del hombre práctico, canta en las sinfonías de los grandes compositores y vibra a través de la visión de los poetas. Puede alcanzar la estatura de un desafío prometeico o reducirse a sí misma a la humildad de un pecador que implora la gracia divina. De una forma o de otra, es algo que nos interesa muy especialmente.

El interés puede ser tan casual como el del simple curioso o alcanzar el éxtasis de estupor que culmina en el clamor: ¿por qué existo yo y por qué existe una realidad?; ¿por qué tenía *yo* asignado este destino? Entre ambas preguntas se extienden todos los grados de respuesta emotiva. Un concepto que suscita tan gran variedad de reacciones no es fácil de definir, ni tampoco es de suponer que posean un único significado.

En ocasiones, sin reflexionar plenamente sobre ello, se hace coincidir la realidad con la verdad: cuando una narración es verdadera sus personajes son reales; la verdad acerca de un episodio es su decurso real; de lo que es verdadero se dice que es un hecho, y los hechos constituyen en cierto modo la realidad. Pero, a efectos de nuestra presente investigación, queremos prescindir de esta identificación popular entre realidad y verdad, cuyo especioso carácter queda de manifiesto tras somera reflexión; porque la verdad, tal como aquí la entendemos, es una propiedad de las afirmaciones, y las afirmaciones pueden hacer referencia o no a la realidad. Un teorema matemático puede ser verdadero y, sin embargo, carecer de todo apoyo en la realidad, mientras que una afirmación acerca de objetos reales puede muy bien no ser verdadera. Por ello, consideraremos siempre la verdad como un término lógico y nunca permitiremos que nos predisponga a una confusión entre lo *formalmente verdadero* y el hecho *material*. De no hacerse esta distinción se aboca a la postura de los realistas medievales, para quienes la verdad lógica implicaba la realidad.

Este libro se propone lograr una comprensión clara, aunque quizá sólo parcial, de qué es lo real; y no comienza con ninguna de las nociones comúnmente divulgadas, pero tampoco puede analizarlas y criticarlas una por una, dado que no poseemos todavía criterio alguno para formar un juicio semejante, y también porque estas nociones son demasiado numerosas para pasar revista a todas ellas. Lo que finalmente resulte de nuestra investigación debe, desde luego, conformarse de un modo general con el uso dominante del término *real*, si es que tal uso es cosa que quepa discernir, pero nuestro análisis lo habrá de purgar de inconsecuencias y vanas pretensiones. Emparejando la mera inspección del uso con una exposición de lo racional y empíricamente significativo, nuestro estudio puede elevarse por encima del análisis semántico y presentar un esbozo, siquiera provisional, de lo que debe comprender la realidad.

En este volumen sólo haremos un intento de iluminar la realidad *física*. Pero el metafísico no tiene por qué temer una actitud tendenciosa ni protestar contra esta limitación como si hubiese de prejuzgar el resultado: tenemos la convicción de que un estudio detenido de cualquier campo revelará sus limitaciones, siempre que ese estudio sea llevado a cabo de buena fe y con todos los recursos que ofrezca. La historia de nuestra cultura está llena de ejemplos en los que disciplinas prósperas y boyantes admiten y reconocen sus límites; la ciencia física

y las matemáticas son entre ellas las que más practican la autocrítica. Por ejemplo, quienes descubrieron la posibilidad de extrañas clases de geometría dotadas de turbadoras propiedades fueron unas personas que trabajaban con la geometría euclidiana y estaban vitalmente interesadas en ella, no nadie que aborreciese esa materia; de un modo análogo, el estudio de la realidad física puede abrirnos los ojos a otros tipos de realidad, posiblemente más extensos. Más adelante diremos algo acerca de la posibilidad y significado de una realidad no física.

Por el momento, pues, parece lo más indicado que examinemos los aspectos más evidentes de nuestro problema, contemplándolo primero desde lejos y aproximándonos luego para una inspección más atenta. Y de esta forma percibimos en seguida una confusión, debida a los diferentes componentes históricos de la idea de la realidad.

1.2. La permanencia

Desde el tiempo de los griegos hemos heredado una preocupación por una especie de "principio del ser", por alguna realidad última susceptible de ser descubierta en, a través de o más allá de nuestra experiencia sensible, pero no idéntica a ella. Al igual que Parménides y Platón, nos sentimos insatisfechos con los mensajes que nos son transmitidos por las percepciones externas, ya que estos mensajes son extrañamente incoherentes, llenos de sorpresas y crípticos en su significado. La mente prefiere contemplar condiciones que se ofrezcan a una pausada y detenida observación: para ella, el cambiante mundo exterior es una perpetua ofensa. Surge así la idea de que el mundo sensible acaso no pueda, después de todo, ser plenamente real, ya que viola el tan querido postulado de permanencia.

Pocos pensadores existen hoy que vayan tan lejos como Parménides en su insistencia sobre una cualidad estática de lo real, pero son muchos los que se hallan fuertemente influidos por su famosos argumentos. Buscar tras los fenómenos de la naturaleza principios y leyes de carácter general es rendir tributo al genio de Platón, y el éxito de la ciencia en su reducción de todas las distintas formas de materia a unas pocas partículas da testimonio de lo esencialmente acertado del sentido ontológico griego. Sin embargo, puede uno naturalmente, pasarse de la raya: el profesor William Lyon Phelps, en sus deliciosas charlas a los estudiantes de Yale, insistía en que la física tiene mucho menos que decir acerca de la verdad y de la realidad que la poesía; y para demostrar su afirmación les preguntaba: "¿Leerían ustedes ahora un libro de física de hace cien años? Evidentemente, no. ¡Pero todavía leen a Shakespeare!"

Al llegar a este punto, quizá deba uno preguntar si *ser* y *realidad,* y más particularmente la realidad física, son efectivamente la misma cosa, tal como hemos supuesto tácitamente aquí. Sin perjuicio de la

ontología, cuya legitimidad estudiaremos a su debido tiempo, tomemos la palabra *ser* en su sentido literal y eliminemos de ellas las oscurecedoras y ominosas cualidades de su equivalente griega. Percibimos entonces que se trata de un verbo auxiliar, más bien desnudo de significado, un verbo convertido en sustantivo sumamente independiente. Ser *algo* es cosa por lo general, comprensible y definida, pero, ¿y ser? Quizá LEWIS CARROLL inventase la sonrisa del desvanecido gato de Alicia como respuesta a este interrogante. La única alternativa a denegar significado a la palabra "ser" es identificarla con "realidad"; o, por lo menos, eso es lo que haremos aquí.

El término *existencia* lo trataremos de forma análoga. Dejando aparte su legítimo y perfectamente definido uso en las matemáticas y la lógica, de cuyo examen prescindimos en este libro, vamos a tomar existencia y realidad como sinónimos.

Antes de eliminar la presencia del ingrediente ontológico griego en nuestra moderna concepción de la realidad, ¿no debemos adoptar una postura respecto a su legitimidad? ¿Qué grado de permanencia e inflexibilidad debe poseer lo real para que hayamos de aceptarlo? La contestación completa a esta pregunta no puede darse al comienzo de la investigación, sino que se sigue de un atento estudio de los métodos por los cuales adquirimos conocimiento de la realidad; pero unas cuantas indicaciones bastarán para proporcionar una orientación preliminar. Ciertamente, necesitamos que la realidad sea algo más permanente que las fugaces impresiones de nuestros sentidos: el árbol, para ser real, debe estar enfrente de mi ventana aun cuando yo no lo esté mirando.

Por otra parte, reconozco que el árbol, por muy real que sea, crecerá, cambiará con las estaciones y, finalmente, morirá; y también cambia con el tiempo nuestro conocimiento de lo real. De hecho, este conocimiento puebla el mundo de entidades cuya vida puede ser larga o corta: los elementos griegos, el flogisto, el éter, y ahora el electrón y otras partículas llamadas "elementales" ¿han de ser rechazados como componentes de la realidad debido al transitorio papel que desempeñan en las teorías físicas?

1.3. EL ASPECTO DE COSA

Dejando aparte estas cuestiones y prescindiendo por el momento del aspecto estático y ontológico del concepto que estamos estudiando, examinemos ahora lo que hemos heredado de los romanos: real es lo que participa de la naturaleza de la *cosa* en cuanto distinta del *pensamiento.* Para el espíritu sencillo la distinción es evidente; para el pensador suscita espinosos problemas que veremos más adelante. En todo caso, nosotros, los pertenecientes a la cultura occidental, nos hallamos tan dominados por la doctrina de la cosa que propendemos a rechazar sin ceremonias toda filosofía que no otorgue importancia a esta distinción.

Qué es lo que ha de entenderse por una cosa o un objeto exteriores en sentido crítico constituye el principal tema de investigación del presente libro. Mas, para despejar el camino que se extiende ante nosotros, expongamos ahora unas cuantas vagas y asistemáticas ideas acerca de la índole de las cosas exteriores, con el fin de que no nos supongan luego una dificultad al realizar un estudio más disciplinado. Aceptemos provisionalmente la tesis de que, si existe una clase de cosas reales, entonces todo lo que nos asalte o nos coaccione desde fuera debe pertenecer a ella, ya que el origen de estas acciones sobre nosotros es independiente de nuestro pensamiento y es, por lo tanto, real en el sentido romano.

Pero el destino lingüístico de la palabra *res* indica que la situación que acabamos de describir está lejos de ser clara. Esta palabra no tarda en desmentir su humilde origen, adquiere el abstracto significado de *res publica* e invierte finalmente su primitivo sentido en expresiones tales como la *res cogitans* de LEIBNIZ. Estas oscilaciones verbales reflejan las incertidumbres existentes dentro de esa idea de lo real, incertidumbres que ofrecen propicias rampas para lanzar sobre ella devastadores ataques. ¿Debe lo real poseer propiedades que sean, a su vez, reales? Si no es así, si algunos de los atributos o algunas de las partes de lo real son proyecciones del reino del pensamiento, quedan inmediatamente en tela de juicio las cualidades independientes, caídas inesperadamente sobre ello, que sirvieron para definirlo. Ahora el dilema se nos aparece ya claro: nadie puede razonablemente sostener que todos los atributos que caractericen aun a la más simple variedad de cosa sean externos y estén dados exclusivamente por la percepción sensible.

Este aserto puede corroborarse aduciendo testimonios de dos tipos distintos: uno, empírico y científico, el otro, epistemológico. En el primer caso hacemos notar que las cosas externas son divisibles, tal vez indefinidamente divisibles. Esto, aunque contradice la ingenua versión de la hipótesis atómica, es, al parecer, el veredicto de la física moderna, la cual indica que incluso las partículas tenidas por elementales pueden ser divididas o forzadas a cambiar de identidad cuando se las somete a un tratamiento suficientemente enérgico; pero, esté o no confirmada por la experimentación esta expectativa, el hecho es que las partículas de magnitud atómica según la concepción actual —protones, neutrones, electrones, mesones— no son perceptibles en el mismo sentido que los objetos que componen y, si las actuales teorías son correctas, nunca lo serán. Ante esta circunstancia nos vemos obligados a admitir que las partes de lo real no son a su vez reales, o, por lo menos, que son reales en algún otro sentido; ahora bien, esta concesión tiende a disolver la supuestamente irreductible cualidad de cualquier cosa, sea la que sea, que nos asalte desde el exterior.

Tal vez no deba esperarse que las partes físicas, espaciales, de una cosa sean de la misma naturaleza que las cosas. Veamos, por consiguiente, qué resultado se puede obtener analizando sus propiedades perceptibles.

Nos enfrentamos aquí con el viejo problema de distinguir entre las cualidades primarias y secundarias de los objetos, siendo aquéllas las que estén adheridas única y significativamente a las cosas, y éstas las que sean inyectadas más o menos espúreamente por el sujeto perceptor. La historia de este problema es sumamente interesante y puede ser desarrollada de un modo extraordinariamente fructífero considerando qué propiedades han atribuido a sus *elementos* —los constituyentes más básicamente reales del mundo en el sentido "romano"— los hombres de los diferentes estadios de la ciencia. ANAXÁGORAS eligió el tamaño, el color y el gusto como cualidades primarias. EMPÉDOCLES tomó el tamaño, la forma y la posición, rechazando el color y el gusto como antropomórficos; y a partir de él la idea de elemento se asocia íntimamente con la de *átomo,* cuyas características dominantes siguen siendo tamaño, forma y posición. La mecánica newtoniana, al centrar su atención sobre la *partícula* —concepto algo más general, que incluye dentro de sí al átomo—, hace recaer todo su hincapié sobre la masa, la posición y la velocidad como atributos esenciales. El alejamiento del familiar plano de la percatación sensible se va haciendo cada vez más evidente, hasta que, por fin, la física moderna se ve obligada a negar incluso que tengan significado expresiones tales como *velocidad exacta* y *posición* en lo que se refiere a partículas pequeñas. Existe una progresiva conversión de las cualidades primarias en secundarias que culmina en las teorías de los *cuantos* del presente siglo, evolución que apunta ominosamente hacia un posible estado en el próximo futuro en el que se hayan desvanecido todas las cualidades primarias y nuestra descripción de los acontecimientos físicos haya llegado a ser totalmente abstracta. Que esto vaya o no a suceder efectivamente es imposible predecirlo; pero tal tendencia, que impregna patentemente la historia del pensamiento científico, debe hacer vacilar a quien deposite toda su confianza en lo sensorial, en lo exterior.

No hay necesidad de detenerse a examinar largamente los acostumbrados argumentos sobre este punto. Es un lugar común, ilustrado por el hecho de la ceguera para los colores, que las cosas se aparecen de modos distintos a las distintas personas; esto excluye al color del grupo de cualidades objetivas y, por tanto, es de presumir que también del reino de la realidad en su versión simple. Prosiguiendo el argumento, puede dudarse de la opacidad de una piedra, de la forma del cuerpo humano, de la presencia misma de una cosa, ya que conocemos la existencia de radiaciones que los penetran y toda vez que podemos imaginar seres cuyos ojos sean sensibles a tales radiaciones en vez de a los rayos luminosos ordinarios. Luego se encuentra el desconcertante hecho de que no todas las características de una cosa externa son percibidas ni perceptibles a la vez e *in situ,* de que la memoria se inmiscuye siempre al establecer lo que compone un objeto sensible: atribuimos un interior a una piedra porque recordamos haber visto otra rota, color a las flores durante la noche porque las hemos observado a la luz

del día [1], una parte de atrás a la luna porque no conocemos ningún objeto físico que carezca de ella, aunque en este último caso la situación es quizá un poco más compleja y con la imaginación constructiva vamos más allá incluso de la memoria. La realidad, si hemos de formarla a partir de impresiones de los sentidos, debe incluir por lo menos, juntamente con las impresiones realmente presentes, todas las que se lleven en la memoria, si no muchas más.

La determinación de lo que es real en el sentido que estamos indagando es fruto muchas veces del sentimiento más que del conocimiento: los criterios utilizables para afirmar la existencia de una cosa son aplicados intuitivamente más que con analítica minuciosidad. Y nuestras exigencias varían apreciablemente desde la primera juventud a la madurez: dentro de la limitada experiencia de un niño las hadas son ciertamente tan reales como las nebulosas galácticas en la experiencia de un adulto; la extrema rigidez de nuestra idea de lo real, su inexorabilidad, se van adquiriendo gradualmente a lo largo de la vida, y podemos preguntarnos si esta rigidez no pertenecerá a la inerte costra de hábitos con que se ha recubierto nuestra indulgente y poco inquieta mente. El mito cruelmente bello según el cual las hadas deben morir cuando un niño deja de creer en ellas suscita a menudo en el niño de siete años una especie de indecisa actitud hacia la existencia, en la que siente un vivo interés por la realidad y, sin embargo, está dispuesto a seguir creyendo en las hadas para evitar que mueran; todavía no es capaz de la ciega confianza en la realidad que más tarde le domina, de esa tan peculiar fe del incrédulo: para él, el hallazgo de la realidad es en parte descubrimiento y en parte invención. ¿Cabe sostener que la existencia puede jamás ser encontrada exclusivamente a través de descubrimientos?

PARMÉNIDES y PLATÓN buscaban las notas de generalidad y permanencia cuando investigaban la realidad; LUCRECIO, tipificando lo que, no del todo exactamente, hemos denominado aquí la concepción romana, trató de estabilizar lo real ligándolo a las informaciones transmitidas por nuestros sentidos externos, esperando así mantenerlo independiente del observador humano. Ambas concepciones constituyen razonables puntos de partida; ambas entrañan dificultades; ambas matizan nuestra actitud actual en relación al problema que nos ocupa y es menester examinarlas.

No nos proponemos recargar este libro con observaciones específicas en torno a los diversos tipos tradicionales de realismo, desde los ingenuos hasta los críticos. Nuestra postura respecto a ellos se irá manifestando claramente a medida que avancemos y vayamos desarrollando una formulación positiva del problema: si planteáramos todas las viejas preguntas correríamos cierto riesgo de obtener las mismas viejas con-

---

[1] Existen excepciones a esta regla. Se dice que el presidente COOLIDGE sostuvo el siguiente diálogo con uno de sus ayudantes mientras cruzaba Detroit en coche:
AYUDANTE: Veo que han pintado los tranvías de Detroit.
PRESIDENTE COOLIDGE: Sí. Al menos por un lado.

testaciones. Mas en cada una de las formas conocidas de realismo que han llegado hasta nosotros como legado de la doctrina de la cosa existe una dificultad básica que es preciso poner de relieve, dificultad consistente en que el realista no puede evitar tener *dos* objetos cuando la experiencia versa solamente sobre uno. El acto de ver un árbol lo involucra en una especie de toma y daca entre el árbol real y lo que él percibe como árbol. No importa aquí el nombre que atribuya a las dos entidades, ni se altera tampoco la situación si tilda a una de ellas de incognoscible, como un kantiano *Ding an sich*: persiste allí un fantasma que lo acosa implacablemente, y la experiencia, como aventura singular y única, se halla siempre presente para ahuyentar al fantasma y turbar la conciencia del realista [2].

1.4. La eficacia

Alejada de un interés por lo general y permanente (Grecia), alejada de una orientación hacia el aspecto de cosa (Roma), nuestra idea de la existencia está dominada por una apreciable cantidad de pragmatismo. Lo real y lo actual van estrechamente unidos: la palabra alemana *wirklich,* aunque no entraña semejanza alguna con la latina *res,* tiene no obstante, el significado de real; literalmente, *wirklich* es lo que actúa, lo que es capaz de producir un efecto [3], si bien, al tratar de concretar más detalles, el significado de la palabra se vuelve borroso, toda vez que no denota si el efecto debe producirse sobre otro objeto o sobre la mente. Algo no real en el sentido romano puede serlo en éste: una idea es pragmáticamente real en tanto en cuanto pueda producir efectos importantes; y Dios, según esta versión, es real para la persona que cree en El.

Si bien esta fórmula parece al principio no tener aplicación a la realidad *física,* habida cuenta de que deja vía libre a especulaciones no basadas en principios fijos, una ligera reflexión bastará, no obstante, para hacer ver su decisiva importancia en la ciencia. ¿Por qué el químico del siglo XVIII creía firmemente en la existencia física de una masa de calor llamada flogisto? ¿Por qué ha funcionado durante tanto tiempo el éter lumínico como una entidad física? ¿Por qué creemos ahora en un universo en expansión? La contestación más sencilla es en cada caso: porque observamos sus inequívocos efectos. De hecho, toda entidad que no pueda ser observada directamente —y esta clase de entidades es más numerosa en la ciencia moderna de lo que común-

---

[2] Whitehead *(The Concept of Nature),* argumentando en contra de la bifurcación de la naturaleza, enfoca bien la cuestión al decir que en la concepción que estamos criticando "habría dos naturalezas, una la conjetura. y la otra el sueño".

[3] Tal es por lo menos su sentido moderno. La palabra *wirken* significaba originariamente tejer.

mente se cree— debe su existencia a una aplicación de la definición pragmática de realidad que atiende a la operatividad.

Nuestra cultura ha levantado un templo a lo real, un templo sostenido por los tres pilares descritos: uno de ellos representa los aspectos constantes y permanentes de la experiencia; otro, el aspecto de cosa, los aspectos externos: el tercero simboliza lo práctico, lo eficaz. Nos hemos acostumbrado a practicar el culto entre ellos (aunque frecuentemente sin gran discriminación), pues el influjo que lo real ejerce sobre nuestras mentes es verdaderamente fuerte, y todo lo que queda depositado ante su altar es incontrovertible y definitivo: para la mayoría de nosotros no existe ninguna instancia superior.

El papel desempeñado por la realidad en nuestro pensamiento, en nuestras vidas, es francamente importante. Muchos, temiendo tal vez el destino del joven Lessing, que murió contemplando a la diosa de la verdad, cuyo velo había cometido la temeridad de alzar, son reacios a enfrentarse cara a cara con la realidad, al menos en una actitud irreverente. Prescindamos de la reverencia y del gentil prejuicio engendrado en nuestro interior por el estudio de la tradición filosófica; instalemos la realidad en medio de los demás problemas que nos preocupan en la actualidad y apliquemos a su estudio los métodos cuya utilidad ha quedado demostrada en otros terrenos.

RESUMEN

Una estimación del significado de la realidad, tal como se entiende comúnmente esta palabra, advierte la existencia de tres vagos criterios: la permanencia, el aspecto de cosa, y lo eficaz en la experiencia humana. Estudiamos sucintamente estos criterios y planteamos varias cuestiones en torno a la adecuación de las teorías que en ellos se basan.

BIBLIOGRAFIA

CASSIRER, E.: *Substance and Function,* La Salle de Ill., The Open Court Publishing Company, 1923.

DEWEY, John: *Experience and Nature,* Nueva York, W. W. Norton & Company, 1925 [vers. cast., *La experiencia y la naturaleza,* México, F. C. E., 1948].

DUCASSE, C. J.: *Philosophy as Science,* Nueva York, O. Piest, 1941.

GILSON, E.: *L'Etre et l'essence,* París, Sorbonne, 1948 [vers. cast., *El ser y la esencia,* Madrid, Gredos].

JAMES, W.: *Essays in Pragmatism,* Nueva York, Hafner, 1948.

LAIRD, John: *A Study in Realism,* Londres, Cambridge University Press, 1920.

LEE, Otis: *Existence and Inquiry,* Chicago, University of Chicago Press, 1949.

MARITAIN, J.: *Existence and the Existent,* Nueva York, Pantheon Books, Inc., 1948 [ed. orig.: *Essai sur l'existence et l'existant,* París; vers. cast.: *Ensayo sobre la existencia y el existente,* Buenos Aires].

MEYERSON, E.: *Identité et Réalité,* París, Felix Alcan, 1912.

OTTO, R.: *Mysticism East and West* (traducida por B. L. Bracey y R. R. Payne), Nueva York, The Macmillan Company, 1932.
SHELDON, W. H.: *Process and Polarity*, Nueva York, Columbia University Press, 1944.
WERKMEISTER, W. H.: *A Philosophy of Science*, Nueva York, Harper & Brothers, 1940.
WERKMEISTER, W. H.: *The Basis and Structure of Knowledge*, Nueva York, Harper & Brothers, 1948.

CAPITULO II

LAS MANERAS DE LLEGAR A LA REALIDAD

2.1. La metafísica de la ciencia natural

El análisis que realizamos en este libro va a apoyar casi todo su peso en la ciencia; y presentar excusas por la adopción de una orientación científica es ridículo en una época en que todo el mundo se maravilla de los éxitos logrados en todos los terrenos por la ciencia. Es evidente que debe urgirse a ésta para que diga todo lo que pueda acerca de toda clase de problemas que sean susceptibles de tratamiento científico; pero al volvernos en esa luminosa dirección nos encontramos con una extraña paradoja: la ciencia nos dirá qué cosas son reales, pero rehusará decirnos qué es la *realidad.*

No hay motivo para sorprenderse por ello, ya que es sobradamente conocido que los científicos, al menos en los dominios que llamamos ciencias exactas, se muestran de acuerdo en las materias comprendidas dentro de su específico ámbito de estudio, pero mantiene puntos de vista notoriamente divergentes en lo que atañe a la realidad: algunos, como Planck y Einstein, son realistas críticos; otros, particularmente Eddington y Weyl, son idealistas moderados, mientras que Heisenberg y Bohr manifiestan un vago positivismo y cierta indiferencia hacia el problema que nos ocupa. Todos, sin embargo, sostienen que los electrones son reales y que no lo es el éter luminoso. Uno puede cultivar la ciencia sin adoptar una postura definida con respecto a la realidad, de hecho sin utilizar siquiera la palabra *real;* puede afirmarse incluso, por regla general, que cuanto menos se diga acerca de la realidad mejor será la calidad de la ciencia. Dentro de ciertos límites, hasta un solipsista puede ser un buen físico.

La causa de todo esto estriba, naturalmente, en que no se trata de un problema físico, sino metafísico, pese al hecho de que nos estamos ocupando de la realidad física. Negar la presencia —es más, la necesaria presencia— de elementos metafísicos en cualquier ciencia es cegarse a lo evidente, si bien el fomento de tal ceguera se ha convertido en nuestros tiempos en una empresa sumamente alambicada. Muchos reputados científicos se han agregado a las filas de la brigada exterminadora, que se dedica ruidosamente a expulsar murciélagos metafísicos de los desvanes científicos; y forman una útil muchedumbre, pues lo que exterminan rara vez es metafísica, sino, por lo general, mala física. Todo cien-

tífico tiene que invocar suposiciones o reglas de procedimiento que no están dictadas por los datos sensibles como tales, reglas cuya aplicación dota de organización y coherencia internas a toda una serie de hechos, los simplifica y hace elegantes y aceptables las teorías: pregúntese a un investigador por qué prefiere una explicación sencilla, por que apoya su conocimiento del universo en un *continuo* e indiferenciado marco de referencia de espacio y tiempo cuando su experiencia inmediata se halla fuertemente escandida por cumbres de atención que separan valles de aburrimiento; pregúntesele por qué invoca un principio de causa y efecto cuando su experiencia le ofrece solamente una sucesión temporal. Puede responder que trata de obtener la representación más económica de su experiencia, o que la constitución de nuestra inteligencia hace necesarias tales reglas para la comprensión, o que cree en la esencial nitidez de la creación; todas estas contestaciones hacen referencia a convicciones metafísicas quizá no de una especie grandiosamente ontológica, pero, ciertamente, de carácter epistemológico. La única respuesta que no entraña sabor metafísico alguno es la dada por el empirista radical, que afirma que *inferimos* la continuidad, simplicidad, causalidad, elegancia y todo lo demás a partir de la experiencia inmediata de los sentidos; mas su respuesta es palmariamente errónea, como esperamos demostrar.

Sería necio dejar a un lado la ciencia simplemente porque no se pronuncie directamente acerca de la realidad, ya que lo que expresa se halla suficientemente cargado de significación para que merezca la pena examinar lo que implique metafísicamente. Lo más interesante es la manera en que llega a cerciorarse de sus verdades; pues, en cierto sentido (que hemos de aclarar más adelante), la realidad no puede ser abstraída de la existencia finita: así como es el *proceso* generador de los números lo que señala y define el infinito, así también es la *metodología* de la ciencia lo que define la realidad física. Una parte considerable de este libro, por lo tanto, debe estar consagrada a la metodología, considerada como parte de la metafísica.

Otros numerosos procedimientos han tendido al mismo fin, y algunos de ellos han logrado a la perfección realizar parcialmente la tarea que aquí abordamos. Es indispensable, sin embargo, un nuevo estudio, porque la metodología de una por lo menos de las ciencias, la física, ha cambiado tan radicalmente en los últimos tiempos que ha adquirido caracteres de urgencia la necesidad de examinarla de nuevo, tanto más cuanto que las modificaciones operadas afectan del modo más directo a la idea de realidad. Pocas personas han visto esto más claramente que el ya fallecido profesor E. CASSIRER [1], con quien el autor tuvo frecuentemente el placer y la fortuna de comentar sus opiniones. La experiencia humana no se limita a la ciencia, ni existen tampoco otras disciplinas que posean su misma metodología; puede, por tanto, nacer

[1] Véase su *Determinismus und Indeterminismus in der modern Physik*, Göteborg, Elanders Boktryckeri Actiebolag, 1937.

la duda de que nuestra respuesta final, obtenida por medios muy especiales, carecerá tal vez de relevancia en un campo más amplio de investigación. Es cierto que así podría ocurrir; pero si nuestros resultados, aunque obtenidos a través de un análisis particular y detallado, apuntan más allá de sí mismos y permiten establecer relaciones con posibles realidades de otras esferas, como efectivamente sucede, poseen entonces poderosas credenciales en favor de su aceptación.

Cabe la posibilidad de llegar a la elección de un método de determinar qué es real por otra vía. Pasando por alto la ciencia y todo conocimiento organizado, por artificial y no representativo de la existencia inmediata, puede uno disponerse a la contemplación de cualquier objeto individual de la realidad y explorar profundamente su significado. Los místicos y los hegelianos han expresado a menudo la actitud de que cualquier objeto real determinado lleva dentro de sí mismo, y presenta a un observador penetrante, todas las cualidades que lo constituyen como real; además (se afirma), el propio juicio se torna inseguro si se deja a la mirada vagar y extraviarse por toda la creación, mientras el misterio que ha de ser resuelto se halla confinado dentro de un concreto pedazo de roca o de una flor concreta.

Hasta dónde conduzca este proceso de circunscripción a lo particular es cosa que parece depender en gran medida del temperamento del observador. Convenció a NICOLÁS DE CUSA (que veía en cada objeto un *parvus mundus* en el que se refleja toda la realidad), de la unidad cósmica de la existencia, de la perfección de Dios y, finalmente, de la rotación de la Tierra alrededor de su eje; y lleva a JEAN SARTRE a deducir la insignificancia, el absurdo y la inutilidad de toda la existencia. Debido precisamente a que es pequeño el número de facetas de realidad ofrecidas por un objeto concreto, las conclusiones que pueden extraerse bajo tan escasas limitaciones son divergentes y variables; sólo un regusto a realidad, fuerte pero vago, puede así captarse.

Lo que acabamos de describir podría ser considerado, siendo más justo con el existencialista, sólo una variedad extrema del más razonable esfuerzo por extraer de una *clase limitada* de casos la esencia de la existencia, siendo la esencia lo que tales ejemplos posean en común. Siguiendo esta vía es casi seguro que habremos de llegar a ese final de trayecto ontológico que permite una hermosa vista sobre el paisaje filosófico griego pero obscurece otros panoramas. Las propiedades de objetos distintos tienden a ser tan flagrantemente contradictorias cuando se las juzga sin un trasfondo *metodológico* que el resto lógico común queda reducido a la insignificancia: lo que les es común, en efecto, se reduce a una mera incidencia, a esa impresionante singularidad del ser que se subsume bajo la más amplia de todas las generalizaciones lógicas, conocida técnicamente con el nombre de principio de contradicción. Ahora bien, que el principio de contradicción debe imperar sobre el reino de la existencia es, ciertamente, una conclusión válida (y no debemos perderla jamás de vista); pero decir que tal principio se

basta a sí mismo para describir aquélla es, evidentemente, engañarse. De aquí se sigue el clásico lugar común (que se conoce en lógica con el nombre de relación inversa entre la extensión y la intensión de los términos, y del que tenemos frecuentes ejemplos en las ciencias exactas) consistente en que la búsqueda de leyes que hayan de ser invariables bajo una máxima variedad de condiciones acaba en unos principios universales, los cuales, si bien válidos casi siempre, apenas dicen nada acerca de cosas particulares. Abandonamos, por consiguiente, esta vía, una vez tomada buena nota del lugar a que conduce.

Preciso es decir, antes de seguir adelante, que la conclusión que acabamos de enunciar repercute hasta cierto punto en todos los intentos de explorar lo real por medios exclusivamente lógicos. Lejos de despreciar la importancia del análisis lógico como eficaz instrumento para estabilizar los fundamentos de las matemáticas y para estabilizar así a la ciencia misma, el autor considera, no obstante, que la preocupación de la lógica por clases y conjuntos, esto es, por entidades puramente estáticas incluídas dentro de los dominios de la existencia, mucho más amplios, la priva de competencia para argumentar ante el tribunal de la realidad física, excepto en tanto en cuanto regule la forma de argumentar permitida. Veremos más adelante de qué sutiles maneras emplea la metodología de la ciencia recursos constructivos e imaginativos y cuán curiosamente selectiva es en sus procesos de verificación. No es misión ni competencia de los principios lógicos dar una representación adecuada del componente dinámico de la experiencia, como tan sencilla y claramente se hace mediante recursos tales como las leyes del movimiento (nos estamos refiriendo, naturalmente, a la lógica moderna, no a la generalizada y difusiva disciplina designada con este término en tiempos de HEGEL).

Sostenemos aquí que la ciencia, considerada como un sistema metodológico vivo, ha de proporcionar la clave para resolver el enigma de la realidad. Pero ¿no existen muchas ciencias, y no emplean métodos de proceder muy distintos? Así es, efectivamente, y esta admisión plantea por sí sola un problema, del que nos ocuparemos en el resto del presente capítulo. Las ciencias deben ser clasificadas teniendo en cuenta sus métodos; si, no obstante sus diferencias individuales, manifiestan signos de converger en algún procedimiento básico común, y si, además, este procedimiento básico incluye como casos especiales las formas en que instintivamente certificamos como reales los objetos de nuestra experiencia, difícilmente podrá negarse la importancia que tales procedimientos revisten para nuestro problema.

2.2. CIENCIAS FRENTE A HUMANIDADES

Es indudable que no existe acuerdo entre los filósofos, ni tampoco entre los docentes, respecto a qué disciplinas son verdaderamente ciencias. No habrá muchos que sostengan que el estudio de la literatura

es una ciencia o que la física no lo es, pero las discusiones surgen cuando se plantea esta cuestión en relación con la sociología o la historia. Tales discusiones pueden trascender de la categoría de estériles polémicas en torno a extremos de índole terminológica y alcanzar una importancia considerable, como en el caso de la cuestión referente a si la ética es, debería ser o no puede ser una ciencia.

Generalmente suelen distinguirse las ciencias de lo que unas veces se denominan humanidades y otras artes liberales. En lo que se refiere a esta distinción, hay dos ideas erróneas que parecen ser generales: una, que se encuentra firmemente arraigada en la historia de nuestra cultura y de nuestras escuelas; la otra, que se desprende con manifiesta evidencia de los métodos empleados en los respectivos campos. Trataremos de combatir detenidamente la segunda al examinar los procedimientos de las ciencias; en cambio, como la primera no es muy relevante para nuestro estudio, pasaremos brevemente sobre ella, si bien no podemos omitir por completo su examen.

Históricamente, las artes liberales significaban la parte secular de las asignaturas enseñadas en las *scholae* medievales, las escuelas eclesiásticas fundadas por CARLOMAGNO en el siglo octavo. Al extenderse y generalizarse este plan de estudios, las asignaturas quedaron encuadradas dentro de dos grupos: el llamado *trivium* (lógica, gramática y retórica) y el *quadrivium* (aritmética, geometría, música, astronomía); este último incluía, pues la única ciencia natural de aquella época, la astronomía. Ninguna separación de la ciencia como tal apareció hasta el Renacimiento, cuando bajo el influjo de un extraño conjunto de circunstancias se impuso una división temporal.

La escolástica floreció en los monasteerios y en las escuelas vinculadas a los castillos de los nobles. Al desarrollarse las ciudades y surgir las profesiones artesanas, una nueva clase de la sociedad dio origen a un nuevo saber profano, dotado de un gran poder: los artesanos más hábiles hacían inventos, y perfeccionaban y reglamentaban su arte; estos hombres, que hablaban las lenguas vernáculas, cuya vida ciudadana y cuyos intereses les apartaban tanto cultural como geográficamente de los escolásticos, tropezaban con la altiva indiferencia de los clérigos de habla latina de las *scholae;* entre ellos se encontraban hombres como LEONARDO DA VINCI, cuyos pocos pulidos diarios, escritos en la lengua popular, suscitaron escaso interés en su tiempo; también los arquitectos de las grandes catedrales (cuyo desconocimiento por parte de los profesores de la época explica nuestra ignorancia incluso de sus nombres) pertenecían al grupo de tales artesanos carentes de celebridad, y asimismo estaban entre ellos los anónimos inventores europeos de la aguja magnética y de la pólvora negra. La ciencia empírica natural ha sido la descendencia de esos desconocidos padres; y su desarrollo tuvo lugar al principio bajo el estigma de la ilegitimidad. Este es el hecho que muchos de nuestros humanistas no están aun hoy dispuestos a olvidar.

La historia ha sido justa, sin embargo, pues corrigió rápidamente su

error, concediendo a la ciencia natural el honroso título de filosofía natural; y los científicos mismos agradecieron reconocidos este gesto y transfirieron parte de su interés a los fundamentos filosóficos y culturales de sus disciplinas. Desdichadamente, se ha dado marcha atrás en esta dirección al obligar, en el presente siglo, la extrema especialización de la investigación científica a un parcial abandono de tal interés. Se trata ciertamente de una aberración temporal tan sólo, humanamente comprensible en vista de los deslumbrantes éxitos de muchas ciencias concretas, y que resulta dolorosa incluso para la conciencia del científico; pero hace recordar al humanista el humilde orígen de la ciencia y le borra de la vista los largos siglos de cooperación armoniosa. Este prejuicio se ve también tal vez agravado por cierto ligero resentimiento debido a un curioso trueque de lenguas: en la actualidad es el humanista el que utiliza el idioma vernáculo, mientras que el científico habla en el esotérico lenguaje matemático.

Pero basta de quejas. Digamos también que la situación presenta igualmente otra vertiente: que los científicos ignoran a menudo las consecuencias filosóficas y —desde luego— las consecuencias sociales de su obra, y que a veces exageran su competencia con vocinglero autoengaño. Esta parcialidad es perfectamente conocida, y objeto de muchas críticas, pero lo que importa consignar aquí es que la historia, vista en su conjunto, no sanciona conflicto alguno entre las ciencias y las artes liberales. Volvamos nuestra atención a aquéllas.

2.3. La clasificación de las ciencias

Existen poderosas voces que nos recuerdan constantemente la unidad esencial de las ciencias y nos hacen preguntarnos en ocasiones si podrá deducirse alguna utilidad de un intento de clasificación. Los enciclopedistas franceses del siglo dieciocho y los proponentes en la actualidad del movimiento de la Ciencia Unificada[2] tienden a minimizar distinciones, a concentrar su atención sobre los resultados de la ciencia y a ensalzar la certeza de éstos. Para ellos, toda investigación digna de este nombre es un gran esfuerzo dirigido a la consecución de respuestas fidedignas a preguntas importantes, sin manifestar preferencia por ningún método determinado ni excluir influencia alguna. Los aspectos comunes de la obra de químicos y físicos, por ejemplo, se revelan no tanto en cómo proceden estas personas sino en la aceptabilidad de sus productos; y la forma correcta de presentar los singulares rasgos de todas las ciencias y la manera adecuada de poner de manifiesto su unidad es, en opinión de Neurath, la enciclopedia.

Puede obtenerse una gran utilidad de una cuidadosa catalogación de

[2] Para una exposición detallada de los fines de este grupo, véase O. Neurath. "Unified Science as Encyclopedic Integration", *International Encyclopedia of Unified Science*, vol. 1, núm. 1, 1938.

conocimientos, pero es preciso denunciar como espúrea la pretensión de ultimidad implicada por tal movimiento, cuyos miembros, salvo unas cuantas notables excepciones, no son científicos en el sentido más estricto: la ciencia es algo más que una relación de resultados que puedan ser afirmados con precisión; en realidad, los hechos pueden ser tan plenamente ciertos que lleguen a ser triviales y carentes de interés para la ciencia, como ocurre con la mayoría de los hechos. La emoción más grande que experimenta un científico se produce quizá, no cuando ha demostrado la validez de una conjetura, sino cuando una desviación de lo esperado le convence de que una teoría generalmente aceptada es errónea. En la actualidad, el interés del físico por el comportamiento de extraños objetos mecánicos, tales como varillas con pesos moviéndose sometidas a ligaduras arbitrarias, es muy escaso, no obstante la posibilidad de que llegara a calcular con precisión sus movimientos utilizando principios conocidos; en lugar de ello, su atención se centra en cosas tales como los mesones, entidades que revolotean esquivamente al borde de la existencia y desafían la eficacia de su *método*: el trabajo más interesante se realiza en el umbral de la certidumbre científica, y es casi seguro que dejarán de interesar los hechos que emerjan por encima de él. En niguna parte, naturalmente, se excitará la ciencia en torno a cuestiones que por su propia naturaleza se vean impedidas de convertirse en certidumbres; pero es preciso no confundir esta confesada restricción de la actividad científica con su objetivo final.

De modo característico, los proponentes del movimiento de la Ciencia Unificada representan la ciencia como una especie de superficie, como una estructura bidimensional. Son aficionados a decir de ella que es un mosaico, un rompecabezas en el que deben encajarse hábilmente las piezas que faltan [3]. Tales metáforas son lastimosamente insuficientes incluso para aludir a lo que el científico hace, ya que le describen como si escogiese entre alternativas ya existentes, cuando en realidad crea novedades en los hechos y en los conocimientos; y fracasan totalmente si se examinan sus ulteriores consecuencias. Pues un rompecabezas queda resuelto una vez que se ensamblen todas sus piezas; pero un problema científico no queda resuelto jamás: por debajo de todo problema existe una región que queda a la vista e iluminada por su misma solución, y en esta región se encuentran siempre nuevos problemas; y la investigación va profundizando cada vez más en esta tercera dimensión, de la que los enciclopedistas hacen cómodamente caso omiso. Nunca podrá valer el imaginarse la ciencia como una superficie bidimensional, pues al ignorar su profundidad falsificamos su naturaleza. Utilizando un símil, podemos afirmar que el mosaico bidimensional de NEURATH debería ser sustituído por algo así como un cristal de tres dimensiones que fuera adquiriendo estructura lentamente en una matriz infinita y amorfa.

---

[3] NEURAT, *op. cit.*, págs. 3-5.

Por razones semejantes nos vemos obligados a rechazar la idea, recientemente expresada por LE CORBEILLER [4], que representa la evolución de las ciencias como un proceso predecible y finito. De acuerdo con esta concepción, existe solamente una cantidad finita de conocimientos susceptibles de ser adquiridos en cada campo, y a medida que las disciplinas van llenando una tras otra su aforo la humanidad avanza hacia un milenio en el que todos los hechos habrán de ser comprendidos, y resueltos todos los problemas científicos y sociales.

Contra esta perspectiva se alza el hecho de que nunca, excepto en la errónea comprensión de ciertas estigmatizadas épocas de la historia, se ha considerado como cerrado un determinado campo de estudio o investigación. La famosa presunción del físico de finales del siglo dieciocho, que consideraba esencialmente cumplida su misión y se resignaba a estimar con mayor exactitud las constantes de la naturaleza, ha quedado sacudida hasta los cimientos por los descubrimientos de las últimas décadas, sin que sea posible volver a tolerarla de nuevo; y muchas personas que no se interesaban en absoluto por las empresas de la ciencia lo han comprendido perfectamente, hasta el punto de que el propio KIERKEGAARD escribió una vez: "Con todo el mundo empeñado en el siglo diecinueve en hacer más fáciles las cosas en todas partes, se necesitaba que alguien las volviera a hacer difíciles." Si el estado perfecto de la sociedad sólo puede ser realizado cuando la ciencia natural haya recorrido todo su decurso, como parece afirmar LE CORBEILLER, nuestra esperanza de alcanzar aquél es indudablemente vana: la ciencia natural seguirá progresando siempre.

2.4. MARXISMO Y CIENCIA

Los fundadores del comunismo [5] mostraron preocuparse mucho por la ciencia y tener muchas cosas que decir acerca de su organización. Centrando su atención sobre los asuntos sociales percibieron, al igual que los primeros positivistas, que toda actividad debe ser juzgada teniendo en cuenta el sistema económico en que se desarrolle y, particularmente, las necesidades económicas de la sociedad. Al aplicarse a las ciencias este juicio permite ver más claramente muchos hechos históricos, muchas interesantes motivaciones de descubrimientos que anteriormente tendían a quedar olvidados, y ha contribuido notablemente al aumento del aprecio popular por la investigación científica. Pero la imagen socioeconómica apenas si presenta más que un panorama histórico, no una clasificación

---

[4] P. LE CORBEILLER: "Man in Transit", *The Atlantic Monthly*, mayo de 1947.

[5] F. ENGELS: *Dialectics of Nature* (traducción de C. Dutt), International Publishers Co., Nueva York, 1940.

V. I. LENIN: *Materialism and Empirio-criticism* (traducción de A. Fineberg), Foreign Languages Publishing House, Moscú, 1947.

Véase también SIDNEY HOOK: *The Meaning of Marx: A Symposium*, Farrar and Rinehart, Nueva York, 1934.

que se halle en concordancia con el contenido específico y los métodos de las diversas ciencias. Para satisfacer esta necesidad, los marxistas recurrieron a la dialéctica hegeliana.

J. B. S. HALDANE [6] nos presenta un claro caso de este procedimiento. Muestra con numerosos ejemplos cómo la ciencia asciende de un nivel de interpretación a otro en tres fases: afirmar una tesis, negar esa tesis y aportar, finalmente, una síntesis. En las matemáticas primitivas, por ejemplo, el proceso dialéctico resulta evidente en el descubrimiento de las fracciones racionales, que fue seguido antitéticamente por el descubrimiento de los números irracionales; y del aparente conflicto entre las dos nociones surgió, mucho más tarde, la comprensiva teoría del continuo numérico en su forma más moderna. El rasgo característico del proceso dialéctico es el reinado temporal de dos teorías rivales, ninguna de las cuales puede ser plenamente acertada ni plenamente equivocada.

Situaciones de este tipo se plantean frecuentemente en la física. Antes de que se conociese la teoría especial de la relatividad, dos acontecimientos eran simultáneos o no lo eran; pero hoy sabemos que muchos acontecimientos concebibles no son ninguna de las dos cosas o lo son ambas: de dos sucesos, por ejemplo, uno de los cuales tenga lugar en la tierra y el otro en el sol, con intervalo entre ambos inferior a siete minutos, puede decirse también que son simultáneos [7] porque es posible encontrar un sistema de referencia en el que ambos se produzcan al mismo tiempo. Otro ejemplo físico es el dualismo existente entre la partícula y la onda: hace treinta años, el físico pensaba que la luz era necesariamente o una partícula o una onda; hoy en día, ha realizado la notable síntesis de considerar ambas alternativas como aspectos parciales de una única entidad.

La química desarrolló la idea de enlaces de valencia y explicó con relación a ellos la estabilidad de las moléculas. Pero no tardó en evidenciarse que una simple asignación de enlaces a los átomos de una molécula dada no podía dar explicación de los hechos de la observación, pareciendo así que tal teoría era falsa; pero ésta ha sido salvada por PAULING, quien ha ideado la teoría de la resonancia y mostrado cómo, en un plano superior, el dilema de enlace o no enlace deja de ser excluyente.

Como ejemplo final, tomado también de HALDANE, enunciemos como tesis la afirmación biológica, que es innegablemente cierta: el hombre es un individuo. Pero igualmente innegable es su negación en la forma: el hombre es una máquina en constante interacción con lo que le rodea. Aquí la síntesis es más evidente que en los casos anteriores: el hombre es ambas cosas.

El marxista sostiene que por la frecuente repetición del movimiento dialéctico, semejante al del vals, la ciencia se remonta a niveles supe-

---

[6] J. B. S. HALDANE: *The Marxist Philosophy and the Sciences*, Georges Allen & Unwin, Ltd., Londres, 1938.

[7] Para una explicación más amplia, véase la sección 7.8.

riores de integración, y suele llegar a una jerarquía parecida a la de COMTE. El método es de una notable sencillez, y lo que implica es cierto; además posee un atractivo especial para el científico práctico, porque le proporciona la confortadora seguridad de que siempre vencerá sus dificultades, ya que toda antítesis dejará paso a una síntesis con tanta seguridad como el día sigue a la noche.

Pero una filosofía puede ser tan verdadera que carezca de contenido positivo; y nos planteamos la cuestión de si no podrá predicarse esto de la concepción dialéctica marxista. Pese a su aparente agudeza, enuncia algo totalmente obvio con pretenciones de profundidad. Para demostrarlo, llevemos la fórmula dialéctica a un campo más sencillo, en el que su trivialidad pueda percibirse más claramente. Consideremos el movimiento de un punto en un plano. Si alguien anuncia como un gran descubrimiento que *el punto puede avanzar con movimiento no rectilíneo,* difícilmente celebraremos su ingenio, pues es una observación trivial que los movimientos pueden efectuarse a lo largo de curvas; y llamemos a este enunciado la proposición A.

Examinemos ahora la proposición B, que diga lo siguiente: *todos los movimientos, a menos que sean rectilíneos, avanzan en tres fases: la primera hacia una línea determinada, la segunda alejándose de ella, y la tercera acercándose de nuevo a la línea pero bajo un ángulo más pequeño que en la primera.* A los efectos presentes, consideremos estas fases como correspondientes a tesis, antítesis y síntesis. La proposición B parece decir algo interesante, algo más bien específico. Puede verse, sin embargo, que es idéntica a la proposición A; lo que hace simplemente es poner una afirmación analítica (un punto en movimiento avanza rectilínea o no rectilíneamente) en forma aparentemente sintética.

Vamos a demostrar que *todo* movimiento en un plano satisface la proposición B. En la figura 2.1, hemos tomado dos casos extremos: *(a)* representa el movimiento siguiendo una trayectoria cuya curvatura no cambie de signo; en *(b)* la curvatura cambia de signo. En ambos ejemplos obtenemos una aproximación al movimiento buscado mediante tres segmentos rectilíneos, *p, q, r,* y trazamos la línea *L.* La proposición B es, evidentemente, verdadera con respecto a los segmentos *p, q* y *r* en los dos ejemplos extremos que estamos presentando, y basta una ligera reflexión para hacer ver que con mayor razón es válida en todos los tipos intermedios de movimiento. Por consiguiente, es trivial: Siempre puede trazarse una línea *L* que la haga ser verdadera. No es trivial, y deja de ser verdadera, *cuando la línea L está especificada de antemano.*

MARX y HEGEL no especifican de antemano la línea *L:* dondequiera que tengan que trazarla para hacer verdadera la fórmula dialéctica, allí estará la dirección del avance. La única excepción se encuentra, acaso, en los campos de la historia y la economía, en los que previeron una orientación general; pero no se traza de antemano jamás ninguna línea cuando el razonamiento dialéctico se aplica a un problema de ciencia natural. Todo su complejo formalismo se reduce, por tanto, a

una modesta afirmación, equivalente a la proposición A: la ciencia puede avanzar sinuosamente.

Nuestro análisis lógico tal vez no haga justicia a las cualidades emotivas de la concepción marxista, pues, al parecer, es corriente que la gente se convierta a ella por motivos distintos a los racionales.

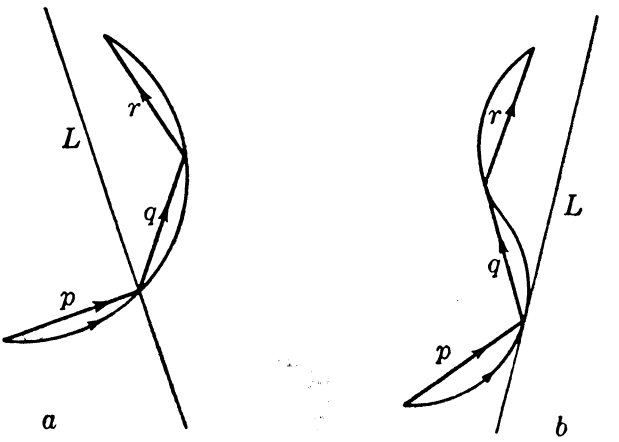


Figura 2.1

Científicos tan eminentes como LANGEVIN y J. B. S. HALDANE afirman que la filosofía marxista les ha ayudado en su obra científica; sin embargo, a la luz del precedente análisis resulta difícil comprender cómo puede lograr tal cosa el principio dialéctico, como no sea a través de un efecto indirecto sobre sus actitudes sociales. Después de todo, también el hecho de la muerte es un lugar común, pero su contemplación puede cambiar notablemente la vida de una persona.

2.5. LA CLASIFICACIÓN DE COMTE

Una de las más notables clasificaciones de las ciencias está contenida en el *Cours de philosophie positive,* de AUGUSTE COMTE. Basada en un poderoso y vasto análisis de la historia humana, la teoría de COMTE contempla una "jerarquía natural" entre las disciplinas especiales, cuyo desarrollo corre parejas con el de todo el pensamiento humano. La humanidad ha recorrido, dos etapas, la teológica y la metafísica, y está a punto de entrar en la tercera y última, la etapa positiva. La primera se caracteriza por la creencia en agentes sobrenaturales, y engendró las religiones fetichistas y teístas; la segunda se aferró a ideas abstractas en sus esfuerzos por explicar los acontecimientos, y dio nacimiento a los sistemas filosóficos. En la era positivista el hombre se contenta con percibir las relaciones entre los fenómenos y formularlas de

una forma invariable; su interés no es ya reflexivo, sino utilitario: "*voir pour prévoir, prévoir pour prévenir*". De manera similar, las ciencias avanzan desde lo general y amorfo a lo específico y articulado; y su estructura lógica queda reflejada en su historia: la base del sistema está constituída por las matemáticas; siguiendo hacia arriba, se encuentra uno con la astronomía, la física, la química, la biología y, finalmente, la sociología, la ciencia fundada por COMTE.

Es un hecho sorprendente pero tranquilizador el que esta ordenación, que inmediatamente se acredita a sí misma como completa y natural, podría haber sido realizada sin la intervención de la filosofía de COMTE y, tal vez, sin ninguna referencia a la historia, ya que se halla también en armonía con el grado de sutileza o refinamiento que prevalece en las distintas ciencias. Y ésta es probablemente la observación más significativa: de un modo u otro, la generalidad en la aplicación parece implicar siempre la existencia de refinadas cualidades en los procedimientos que se utilicen. No es cuestión que deba ser decidida ahora si las matemáticas y la física disfrutan de mayor refinamiento que los demás componentes de la jerarquía natural de COMTE porque son más generales, o si son más generales porque son más refinadas; en cualquier caso, no están pasadas de moda, como exigiría de ellas la doctrina positivista. Con este desplazamiento de la atención desde el contenido a la estructura nos hemos alejado de la filosofía, buena o mala, que subyace bajo la clasificación y nos hallamos de nuevo enfrentados con la cuestión del método. ¿Cuáles son, entonces, las diferencias existentes en el método o métodos practicados en las diversas ciencias?

2.6. CORRELACIÓN FRENTE A EXPLICACIÓN TEORÉTICA

Al hablar de métodos no nos referimos fundamentalmente a los procedimientos experimentales en boga: si bien son importantes, solamente pueden estudiarse teniendo en cuenta el trasfondo conceptual del que surjan y del que extraigan su validez: las técnicas de la química orgánica carecen por completo de significado para la persona que no conozca o no acepte la teoría de la estructura molecular; de modo que estudiar las técnicas como tales con la ayuda de manuales de laboratorio es una tarea necesaria, pero solamente preliminar. Parece ocioso insistir en esta verdad de Perogrullo y, sin embargo, toda nuestra sociedad adolece de un desequilibrado aprecio de las técnicas externas, que culmina en la veneración de los artilugios. Los procedimientos experimentales resultan añadiendo a la teoría básica la habilidad; nos proponemos examinar detenidamente el primero de dichos componentes, aunque siempre con relación al segundo.

Hay algo muy sencillo que puede decirse de todas las ciencias: acopian datos y los comparan. Los datos son completamente diferentes en las distintas ciencias y lo que se designa con esta palabra necesita

una detallada aclaración (véase el capítulo cuarto), pero damos por supuesto que comprendemos este término. Por otra parte, se estima que el proceso de comparar es el mismo en todas partes: el sociólogo relaciona un dato, por ejemplo, la asistencia a la iglesia, con otro, *v. gr.*, la existencia de una guerra, y encuentra que ambos suelen presentarse juntos frecuentemente; el físico "compara" la aparición del relámpago en el firmamento con la producción del trueno y advierte que el uno acompaña generalmente al otro. Un enunciado de este tipo es, pues, aplicable a innumerables actividades científicas, y tal vez parezca a primera vista que las caracteriza adecuadamente; en un sentido más profundo, sin embargo, contiene una palmaria desproporción, que percibimos vagamente cuando la palabra *comparar* se utiliza en el caso de asociaciones invariables tales como la salida del sol y la aparición de la luz del día: la comparación parece ocultar una multitud de juicios, que será necesario manifestar explícitamente. Hace buen efecto solventar la cuestión diciendo que el emparejamiento de datos es directamente causal y, por lo tanto, invariable, o múltiplemente enlazado a otros datos y, por lo tanto, probable, o simplemente accidental. Pero este análisis es tan superficial que no merece que le dediquemos más atención, ya que la ciencia (en particular la ciencia reciente) está llena de causas que no pueden clasificarse entre los *datos* que se comparan.

Lo que consideramos solución correcta del problema irá poniéndose gradualmente de manifiesto a medida que avance este estudio. Nuestro propósito por ahora es aclarar, por referencia a unos cuantos ejemplos, algunas diferencias puramente formales que existen entre los resultados de los actos comparativos realizados en ramas diversas de la ciencia; así prepararemos el camino para el estudio más sistemático que se encontrará en los capítulos siguientes.

En lenguaje técnico, la aparición simultánea o sucesiva de fenómenos diferentes (nuestros anteriores "datos") se denomina una "correlación", y ésta es mensurable. (A efectos de una mayor sencillez, consideramos la correlación entre *dos* tipos de observaciones, aunque podría realizarse el estudio con muchos más.) Pero puesto que nos alejaríamos del corazón de la ciencia si no dotáramos a nuestras observaciones de propiedades cuantitativas, introduciremos inmediatamente algunos rasgos de esta índole; así, en vez de limitarnos a observar la presentación conjunta del relámpago y el trueno, especificamos también la intensidad del relámpago y la sonoridad del trueno que le siga. Los estadísticos han ideado numerosos modos de expresar cuantitativamente lo apretado, por así decirlo, de una correlación, y tales expresiones reciben el nombre de coeficientes de correlación; no es necesario exponer aquí las reglas para calcularlas a partir de un grupo dado de observaciones, toda vez que son conocidas por la mayoría de los científicos: baste decir que existe un gran número de reglas de este tipo, cada una de las cuales conduce a una medida numérica apropiada para ciertas clases de datos. Utilizaremos una que produce el valor 1 cuando las dos magnitudes me-

dias, *A* y *B*, son proporcionales entre sí, y el valor 0 en el otro extremo, cuando no existe correlación en absoluto. Así, en el ejemplo relámpago-trueno, este coeficiente de correlación tendría su valor máximo, 1, si la sonoridad del trueno (intensidad acústica, para ser más exactos) fuese siempre proporcional a la intensidad del relámpago. Pero, puesto que no existen observaciones utilizables sobre el relámpago y el trueno, nos ocuparemos de otros ejemplos.

El primero es, desde luego, artificial: lo he elegido porque el resultado será casi obvio para el lector. Supóngase que escribimos en una columna los números naturales del 11 al 30, y en otra columna contigua sus cuadrados; luego tachamos la primera cifra de todos los números de la primera columna y la primera y última cifras de todos los números de la segunda columna. Quedan así dos columnas de cifras, y nos preguntamos si existe una correlación entre los pares horizontales de números.

No se percibe ninguna a simple vista, pero ello no constituye prueba concluyente de la ausencia de correlación. Cuando calculamos el coeficiente resulta tener el valor 0,104, inquietantemente próximo a cero. No existe casi correlación, pero, aunque pequeña, hay alguna, introducida por la forma en que han sido engendrados los números.

El ejemplo siguiente está tomado de CHARLIER[8], que presenta varios interesantes datos meteorológicos reunidos a lo largo de un determinado período de años. Se parte de mediciones de *A*, la cantidad anual de lluvia recogida en cierta región de Suecia, y de *B*, el caudal de agua llevada por los ríos en dicha región; si se calcula el coeficiente de correlación entre *A* y *B* se obtiene el valor 0,705, que indica claramente la presencia de cierta vinculación.

Como tercer ejemplo, tomamos una serie de precisas mediciones físicas realizadas sobre presiones *P* y correspondientes volúmenes *V* de un gas a temperatura constante (ley de BOYLE). Al calcular la correlación entre *P* y $1/V$ encuentra uno, para asombro suyo tal vez, un valor de 0,9999918. Se halla tan próximo al límite 1 que cabría especular acerca de si no habrá hecho aparición en este último ejemplo una nueva clase de vinculación no adecuadamente expresable por medio de un coeficiente de correlación. Sospechamos la existencia de una "ley de la naturaleza".

Pero, ¿es una ley de la naturaleza el mero enunciado de una vinculación razonablemente invariable entre dos fenómenos? Es posible, verdaderamente, adoptar la posición de que la ciencia consiste en asentar un catálogo universal de coeficientes de correlación entre todos los fenómenos perceptibles: se trata de una actitud no infrecuente entre los estadísticos y muy próxima a las adoptadas por MACH, MILL, PEARSON y el círculo de Viena. Admitimos que es lógicamente inatacable, y, siendo una toma de posición mínima, representa desde todos los puntos de vista la concepción más segura. Pero hace violencia a ciertas ciencias.

[8] C. V. L. CHARLIER: *Vorlesungen über die Grundzüge der mathematischen Statistik*, Lund, 1920, págs. 88 y sgs.

Lo que esperamos demostrar es que existen ciencias para las que esta concepción es idónea, otras para las que resulta extraña y que aquéllas se hallan constantemente caminando hacia el estado de éstas. De acuerdo con esta situación, distinguimos entre *ciencias correlacionales* y *ciencias teoréticas,* o, mejor, entre procedimientos correlacionales y teoréticos dentro de la ciencia.

Los investigadores que buscan una explicación básica nunca se conforman con la simple enunciación de los coeficientes de correlación. Su reacción ante el descubrimiento de que, en nuestro último ejemplo, el coeficiente difiere de la unidad en menos de 0,00001 es de curiosa consternación; experimentan la necesidad de explorar más profundamente, de *derivar* esta extraña uniformidad de la experiencia de principios no inmediatamente dados. Una completa comprensión de lo que de hecho realizan todos cuantos trabajan en las ciencias exactas es el problema central de la filosofía actual de la ciencia.

Aun a riesgo de insistir con exceso sobre este punto, queremos ilustrarlo por otros medios. Es bien sabido que los egipcios, mucho antes de los tiempos de PITÁGORAS, conocían y utilizaban la regla tres-cuatro-cinco para apear los terrenos del valle del Nilo. Esta regla expresa el conocimiento de que la hipotenusa de un triángulo rectángulo cuyos catetos miden tres y cuatro unidades tiene una longitud de cinco unidades, y en sus implicaciones ulteriores es prácticamente equivalente al teorema pitagórico; sin embargo, rendimos homenaje a la demostración matemática de PITÁGORAS. (Pasamos por alto a los efectos presentes los testimonios históricos que indican que el teorema en cuestión era ya conocido por los hindúes y los babilonios antes de que PITÁGORAS lo demostrase.) ¿Por qué había de ser tan importante idear una demostración que no añade nada a los conocimientos empíricos con que ya se contaba? ¿Qué es lo que distingue al filósofo griego de los atentos observadores de Egipto? La contestación es: por medio de su actuación nació una *teoría;* se quebró la superficie de mera correlación, y dio comienzo la explicación de lo que yacía bajo ella; por decirlo de otra manera, la contingencia de la correlación dejaba paso a la necesidad lógica. Esta afirmación conserva toda su significación aun cuando se admita que la necesidad no es absoluta sino hipotética, dependiente de la validez de las premisas euclidianas.

Los científicos saludan siempre el descubrimiento de vinculaciones subyacentes a la superficie con un aplauso que sería inmerecido si el descubrimiento no sirviera a otra finalidad que la de aumentar y organizar los conocimientos empíricos. Pero tampoco se limitan tales conexiones a suministrar un útil procedimiento nemotécnico para recordar hechos: esto se hacía perfectamente bien, a principios de nuestro siglo, por medio de la *fórmula de* BALMER, que permitía una predicción exacta de las frecuencias de las líneas en el espectro del hidrógeno (intercalando números enteros sucesivos en esta expresión matemática podían calcularse fácilmente las frecuencias de todas las líneas conocidas);

sin embargo, fue la demostración realizada por BOHR en 1913 de la fórmula de BALMER lo que impresionó a los físicos: aquello sí era algo verdaderamente deslumbrante, que solventaba el problema. Además, con esta demostración nació una teoría del átomo: una luminosidad interna resplandecía súbitamente a través de la fórmula empírica.

Las ciencias sociales y la economía no están todavía iluminadas por numerosos ejemplos de demostraciones creadoras. La psicología presenta unos pocos, tales como la ley de WEBER-FECHNER, y está volviéndose cada vez más consciente de su importancia; la biología, en particular la genética, está haciéndose rápidamente teorética, y la ciencia física ha aprovechado casi a todo lo largo de su historia cuantas ocasiones se le han presentado de utilizar una demostración racional. (Es cierto que la ciencia de la mecánica de ARISTÓTELES con su distinción entre movimientos naturales y violentos y su consiguiente definición de fuerza, era predominantemente correlacional: hasta los tiempos de GALILEO y NEWTON, que echaron mano de los conceptos de masa y aceleración, la mecánica no se convirtió en una disciplina verdaderamente teorética.) Los testimonios históricos indican que todas las ciencias comienzan al nivel correlacional y evolucionan progresivamente hacia la fase teorética, de modo que, cualquiera que sea la fase en que nos fijemos, ninguna ciencia es enteramente correlacional ni enteramente teorética; sin embargo, si existe una distinción metodológica significativa, es la de que una ciencia sea o predominantemente correlacional o predominantemente teorética. Y en este sentido cabe denominar correlacionales a partes determinadas de la biología, la psicología y la economía, mientras que las matemáticas, la física y la química son ciencias teoréticas.

Debemos ahora al lector una explicación más detallada y precisa de lo que constituye este último tipo de disciplina, pues es dentro de su estructura donde radica la clave de la realidad física.

Una ciencia teorética, o deductiva, no se mueve exclusivamente en el impalpable aire de la razón, sino que su validez proviene de una constante referencia a lo empíricamente dado. Por consiguiente, vamos a escudriñar en el capítulo siguiente la clase de conocimientos a que pueda aplicarse la expresión de *empíricamente dado*.

RESUMEN

Las vagas y encontradas indicaciones que han aparecido en este primer capítulo parecen alcanzar precisión dentro de la ciencia. Pero, ¿qué es la ciencia? ¿Hasta qué punto es algo más que una colección de conocimientos específicos? Para responder a estas preguntas hemos escudriñado ante todo las marcas distintivas que separan las ciencias de las humanidades, y hemos visto que, en la mayoría de los casos, eran inexistentes: la diferencia entre unas y otras, que tanto se proclama, resulta ser poco más que un accidente histórico.

Hemos intentado luego clasificar los diversos cuerpos de conocimientos a los que comúnmente se conoce con el nombre de ciencias. Al hacerlo prestamos mientes a las concepciones representadas por el movimiento de la Ciencia Unificada, por los hegelianos y marxistas y, finalmente, por los positivistas comtianos. Hemos sacado la conclusión de que cada una de ellas ilumina aspectos parciales del significado de la ciencia, pero sin que ninguna llegue a acertar en el corazón del problema.

En la sección 2.6, procuramos demostrar que un análisis del método científico (frente a lo que sucede al revisar las materias de estudio) confiere a ciertas ciencias una dimensión de unicidad. En efecto, hay unas que avanzan estableciendo *correlaciones,* esto es, comparando la incidencia de datos de diferentes clases (analizamos estos procedimientos con referencia a diversos ejemplos apropiados); pero en determinada fase del desarrollo, algunas ciencias han abandonado el método correlacional y han abrazado el uso de hipótesis teoréticas, a partir de las cuales pueden, en cierto sentido, ser *deducidos* los hechos; y, como consecuencia, estas ciencias se han convertido en *teoréticas,* exactas o deductivas. Ninguna ciencia es exclusivamente correlacional ni exclusivamente deductiva, sino que el carácter de una disciplina dada puede participar preferentemente de uno u otro método (aclaramos con ejemplos el significado de la transición de la fase correlacional a la teorética) La lógica inductiva ocupa un lugar importante en la primera fase, y la lógica deductiva en esta última.

En la historia de todas las ciencias se advierte una tendencia hacia el método teorético que parece respaldar la afirmación de que es una metodología más perfecta y, en definitiva, la más deseable. Aceptando esta indicación, nuestro estudio se vuelve ahora hacia un examen de la epistemología peculiar de las ciencias teoréticas.

BIBLIOGRAFIA

CASSIRER, E.: *Das Erkenntnisproblem in der Philosophie und Naturwissenschaft der neueren Zeit,* Berlín, B. Cassirer, 1922 [vers. cast.: *El problema del conocimiento en la filosofía y la ciencia modernas* (3 vols.), México, F. C. E., 1953-1957].

COHEN, M. R.: *Reason and Nature,* Nueva York, Harcourt, Brace and Company, Inc., 1931.

COHEN, M. R., y E. NAGEL: *An Introduction to Logic and Scientific Method,* Nueva York, Harcourt, Brace and Company, Inc., 1934. [vers. cast. (parcial): *Introducción a la lógica y al método científico.—I. Lógica formal,* Buenos Aires, Amorrurtu, 1968].

EDDINGTON, A. S.: *The Nature of the Physical World,* The MacMillan Company, Nueva York, 1928 [vers. cast.: *La naturaleza del mundo físico,* Buenos Aires, Ed. Sudamericana, 3.ª ed., 1945].

EINSTEIN, A.: *The World as I See It,* Nueva York, Covici, Friede, Inc., 1934.

JEVONS, W. S.: *The Principles of Science,* Londres, Macmillan & Co., Ltd., 1924 [vers. cast.: *Los principios de las ciencias,* Buenos Aires, Espasa Calpe, 1946].

LEWIS, C. L.: *Mind and the World Order,* Nueva York, Charles Scribner's Sons, 1929.

MONTAGUE, W. P.: *The Ways of Knowing,* Nueva York, The Macmillan Company, 1925.
MURPHY, A. E.: *The Uses of Reason,* Nueva York, The Macmillan Company, 1943.
NORTHROP, F. S. C.: *The Logic of the Sciences and Humanities,* Nueva York, The Macmillan Company, Nueva York, 1947.
SANTAYANA, G.: *Realms of Being,* Charles Scribner's Sons, Nueva York, 1942.
SHELDON, W. H.: *Strife of Systems and Productive Quality,* Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1938.
STACE, W. T.: *The Nature of the World,* Princeton University Press, Princeton, N. J., 1940.
STEBBING, L. S.: *Philosohy and the Physicists,* Methuen & Co., Ltd., Londres, 1937.
TAYLOR, A. E.: *Elements of Metaphysics,* Methuen & Co., Ltd., Londres, 1903.
WEISS, P.: *Reality,* Princeton University Press, Princeton, N. J., 1938.
WHITEHEAD, A. N.: *The Concept of Nature,* Cambridge University Press, Londres, 1920 [vers. cast.: *El concepto de naturaleza*].
WHITEHEAD, A. N.: *The Principles of Natural Knowledge,* Cambridge University Press, Londres, 1925.

CAPITULO III

¿QUE ES LO INMEDIATAMENTE DADO?

3.1. El científico como espectador de lo dado

Para la mayoría de los científicos y para muchos filósofos lo inmediatamente dado no constituye motivo alguno de disputa. La mesa sobre la que escribo, el automóvil que cruza ante mi ventana, el sol en el firmamento son objetos con cuya palpable presencia es preciso contar; como objetos de sensación inmediata, son fuentes de conocimiento, complejos en la memoria, orígen de series de pensamientos. A casi todos los efectos es completamente adecuado (útil, en realidad) frenar la reflexión cuando trata de ir más allá de este lugar común; no sólo implica su indiscutida aceptación nuestra actitud normal con relación a las tareas cotidianas, sino que gran parte de la ciencia se basa en ello con éxito, particularmente la ciencia llamada correlacional, que en tan alto grado confina con lo dado.

Pero cuando comenzamos a analizar los términos a los cuales se contrapone lo inmediato, términos tales como *conocimiento, memoria* o *pensamiento,* aparecen ciertas dificultades. ¿Dónde termina la sensación y empieza la memoria? ¿Daría lugar la mera apercepción sin pensamiento a que viéramos el sol como un objeto externo, o no surgiría sino una confusa mancha amarillenta, tan falta de objetividad como un dolor de muelas? Nos proponemos plantear ahora estas cuestiones de un modo provisional y general, únicamente para transformarlas después en problemas más específicos a los que la ciencia da de hecho algunas respuestas. (La física moderna está *basada* sobre una respuesta específica: no se la puede entender coherentemente si no se recuerda siempre tal respuesta.) Las preguntas que acabamos de formular hacen conveniente que examinemos cuidadosamente, apoyándonos en razones filosóficas, lo inmediatamente dado; y, lo que es más importante, ciertas fases de la ciencia moderna, tales como la física atómica, nos imponen esta tarea como condición imprescindible para todas las investigaciones.

Por enunciar de antemano lo que vamos a encontrar: la ciencia tradicional se ha mostrado demasiado generosa invistiendo de muchas y significativas cualidades a las impresiones transmitidas por los sentidos, cualidades que, según la imagen moderna, no poseen en sí mismas y que la física cuántica ha tenido que rechazar. Habremos de reconocer

que el hecho sensorial nace en la pobreza y no lleva una hogaza de plata bajo el brazo.

La forma más sencilla, y también la más común, de caracterizar la actividad científica es representar al científico como un observador erguido en medio de un universo y rodeado por todas partes de realidades perceptibles y percibidas. Forma parte del universo, mientras este último no forma parte de él, pues no constituye sino una parte insignificante del universo, y éste puede existir sin él: su desaparición sólo lo afectaría ligeramente; desde luego, no lo destruiría por completo, sino que, según es de presumir, quedarían otros observadores, que podrían atestiguar su permanencia. Y por lo que se refiere a la existencia del universo cuando ningún espectador se halle inmerso en él, la mayoría de los científicos responderían afirmativamente a la cuestión, aunque algunos la considerarían carente de sentido. Se pone en un ligero compromiso a todo el que proponga la tesis que afirma la existencia independiente cuando se le pide que especifique los límites entre el espectador y el resto del universo: tendrá que admitir que la mayor parte de su cuerpo pertenece al resto y, si se le presiona suficientemente, que pertenece a él la totalidad del mismo; con lo cual retrocederá hasta la ciudadela de lo mental como la única parte verdaderamente espectadora del universo. Lo mental, o el ego, aparece entonces como una singularidad en una estructura por lo demás continua y regular.

La fuerza de esta postura dimana de su completa sanción por el sentido común. Este es el residuo del método científico que goza de aceptación popular, y, por consiguiente, las pruebas en favor de la doctrina del espectador radican en la circunstancia de que hemos logrado edificar sobre ella la ciencia física. Su validez, en efecto, depende del éxito de la ciencia así formulada; si la ciencia empieza a fracasar por su causa, debe abandonarse la doctrina en cuestión [1].

Veamos en qué sentido ha producido esta concepción una adecuada epistemología de la ciencia y en qué sentido ha fracasado a este respecto.

3.2. La concepción mecanicista de la naturaleza

El desarrollo de la doctrina del espectador ha corrido parejas con el auge de una rama especial de la física, la mecánica, y es de hecho su correlato lógico. Los primeros estudios griegos acerca de las propiedades de la *substancia,* que durante la Edad Media se concretaron en el interés, más delimitado, por el significado de la *materia,* condujeron al descubrimiento de las leyes del movimiento de Newton, que hizo época. La misma generalidad de estas leyes y la exactitud de sus predicciones se consideraron como pruebas de la universalidad y ultimidad de

[1] Cabe la posibilidad de que su abandono entrañe tal vez un ulterior y notable cambio: puede eliminar la singularidad, lo mental, y relevar así al filósofo del problema del alma y el cuerpo.

las entidades a que se refieren, esto es, las partículas materiales; así se concibió la materia como aquello que posee masa, y a todo el universo como materia portadora de masa. El espectáculo contemplado por la física newtoniana es uno en el que ciertas masas se mueven en el espacio y el tiempo absolutos y son susceptibles de ser contempladas por la mente.

La historia de la física reciente ha disminuído considerablemente su sencillo esplendor: el majestuoso reposo del espacio absoluto, merced al cual el movimiento de las partículas dentro de él resultaba, por contraste, tan impresionante y notable, se volvió difícil de mantener, y lo que primero pareció ser una especie de fondo ambiental estabilizador del movimiento se ha transformado en una incierta y débil adherencia a las masas móviles: el espacio absoluto se ha convertido en relativo y debe ahora su existencia a los cuerpos. Aun así, el universo sigue todavía lleno de masas en movimiento, pero ha desaparecido el fondo estático y con él, en cierto modo, todo el gran sistema: para ver si una masa se mueve, el espectador debe ahora mirar también a otra masa, pues solamente el movimiento relativo posee significación. Estas curiosas dificultades de la naturaleza mecanicista, aunque no gozaron de reconocimiento pleno hasta que la teoría de la relatividad las dio todo su relieve, preocuparon no obstante a los newtonianos ya en los primeros momentos: las obras de EULER y KANT proporcionan la prueba más clara de las dudas en que se vieron sumidos por la relatividad del espacio de la mecánica.

Luego, también el concepto de masa comenzó a perder su fundamental significación: se descubrió que a las partículas de masa, les estaban asociadas frecuentemente cargas eléctricas, y al finalizar el siglo se pensó que toda masa era de carácter electromagnético. Hoy en día, con el descubrimiento de los neutrones y los fotones, que tienen masa pero no carga, se hace preciso negar la posibilidad de esta reducción, y la masa (energía) ocupa un puesto en pie de igualdad al lado de la carga eléctrica. Cualquiera que sea el veredicto de la investigación moderna en lo que se refiere al problema masa-carga, es ya indudable que el material que se mueve en el escenario mental es mucho más sutil que las masas de NEWTON, que se han resuelto en arremolinadas esencias con una generosa mezcla de espacio vacío. Nada de esto, naturalmente, recusa el drama espectador-espectáculo como la representación básica de la ciencia; simplemente, indica que no todo va bien en la escena. La física reciente, sin embargo, presenta argumentos mucho más eficaces.

3.3. ES PRECISO REPARAR EL MECANISMO

La imagen de un espectador (o acaso una mente) inserto en un universo objetivo guarda una extraña analogía con una teoría de la física moderna, la electrodinámica. El físico ha intentado durante largo

tiempo comprender la interacción de dos cargas dejando que la primera de ellas produzca una fuerza que obligue a la segunda a moverse: análisis que implica una separación ideal entre una carga *productora de campo* y una carga *móvil*. Ahora sabemos que esta distinción es falsa, y que en el mejor de los casos constituye sólo una aproximación; vamos a ver cuán instructivo es examinar en qué medida tuvo éxito y por qué terminó por fracasar.

No insinuamos que la relación entre espectador-universo sea algo más que una analogía formal de la relación entre las dos cargas: lo único que afirmamos es que tenemos aquí dos situaciones en cada una de las cuales se ha trazado una arbitraria distinción entre dos partes. En la situación filosófica topamos con dificultades, pero éstas son de origen incierto; en la situación física encontramos dificultades que son en todo semejantes formalmente, y vemos de dónde proceden pues aquí cabe remontarse desde las dificultades que surgen hasta la distinción originaria. Y esto nos lleva a preguntarnos si no deberá impugnarse, igualmente, por ventura, la relación espectador-universo antes de que la filosofía pueda seguir adelante.

Veamos los detalles de esta analogía.

En electrodinámica, se dice que una partícula cargada se encuentra en interacción con otras partículas cargadas a través de un *campo*. Más específicamente, la fuerza de una sobre la otra es igual a c/r^2, siendo c una constante para cargas dadas y r la distancia entre las partículas; esta función, que asigna un valor a todo punto del espacio excepto aquél en el que $r = 0$, representa el campo de COULOMB; y el punto para el que $r = 0$, y, por lo tanto, en el que las dos partículas coinciden, es una singularidad, porque en él la fuerza se hace infinita. Pues bien, toda la electrodinámica clásica se desarrolló dando por sentada la validez del campo de COULOMB; y fue sumamente fructífera siempre que se respetaron dos condiciones: (*a*) es preciso evitar el punto singular, y (*b*) una de las partículas tiene que permanecer fija. La condición (*a*) significa que la carga móvil debe mantenerse a una distancia finita de la carga fija, o carga productora de campo; le segunda condición veda toda pregunta con respecto al destino de esta última carga: la singularidad matemática sella el misterio de la entidad que determina el movimiento de la otra entidad, en forma muy semejante a como lo mental oculta dentro de sí la fuente de su propia determinación. La electrodinámica coulombiana imprimió sobre las cargas en interacción una artificial distinción sujeto-objeto; logró con ello explicar los fenómenos en los que la carga sujeto era fija y la carga objeto móvil, pero rodeó a la carga sujeto de una barrera impenetrable para la comprensión.

La persistencia de este enigma se ha hecho intolerable en la física. Investigaciones recientes sobre electrodinámica cuántica imponen de modo imperativo que se elimine la singularidad del campo de COULOMB, y así han intentado hacerlo algunos de los más capacitados investigadores, aunque sin haberlo logrado plenamente todavía. Un resultado aparece

claro: jamás comprenderemos la interacción eléctrica de varias cargas mientras no se las trate a todas sobre un mismo pie de igualdad, mientras que no se conseguirá nada manteniendo fija una de ellas, pues la ignorancia respecto a una carga suscita incertidumbres en lo que se refiere a la conducta de todas las demás. Ahora resalta claramente la analogía con la distinción espectador-espectáculo: el espectador puede ser comparado a la carga productora de campo, el espectáculo a la carga móvil.

Es interesante observar que la asimetría inherente a la relación espectador-espectáculo está dando origen a dificultades parejas en la filosofía de la física moderna. Más adelante estudiaremos con detalle el *principio de incertidumbre*; de momento, damos por supuesto un conocimiento general del principio por parte del lector y nos limitamos simplemente a aludir a su función de enlazar al observador con la observación. Según este principio, el acto de la observación produce un importante efecto sobre lo observado; y verdaderamente, el acto de conocer tiene un importante efecto sobre lo conocido.

No debe el filósofo menospreciar esto como evidente por sí mismo, como un mero ejemplo de lo que él ha sospechado durante largo tiempo, esto es, que las mediciones implican siempre una incertidumbre debido a las incertidumbres inherentes a la condición de los instrumentos de medida empleados: el físico sería el primero en aceptar este consuelo y recurriría inmediatamente a sus acostumbrados métodos de corregir tales incertidumbres, ya que lleva mucho tiempo utilizando la teoría de errores. Aquí, sin embargo, no le servirá: la reciprocidad entre observador y observación tiene un carácter más fundamental y, como se verá más adelante, exige que se formule de nuevo todo el conjunto de la descripción física; exige, de hecho, que se abandonen algunas características muy importantes de la relación espectador-espectáculo. Esta relación conserva validez sólo en cuanto aproximación a una descripción más verdadera, aproximación que resulta ser adecuada a los fenómenos de nuestra vida cotidiana.

Lo que nos hace a muchos de nosotros reacios a renunciar a nuestro papel como espectadores es la sólida evidencia de lo que se presume que es "inmediatamente dado". Se ven moverse las masas en movimiento; están evidentemente delante de nosotros, en el tiempo y en el espacio, y ocupan posiciones definidas en instantes definidos de tiempo. En otras palabras, la concepción mecanicista, que tan íntimamente va unida a la representación del universo que estamos examinando, parece verse apoyada por todo cuanto nos revelan los sentidos. No nos apresuremos, por tanto, sino examinemos detalladamente el significado del mecanismo y veamos si resiste la prueba del escrutinio científico. Pero primero unas palabras de disculpa.

Tal vez haya parecido deplorablemente vago el uso de la palabra *mecanismo* en las líneas que anteceden (si bien esperamos redimirnos de esta falta en la sección siguiente): un observador que contemple los

objetos que le rodean no necesita ser mecanicista, ya que puede aplicar a su mundo leyes que no sean mecánicas; y el ejemplo de las cargas en interacción no era estrictamente mecánico. Pero estas diferencias son poco importantes: todo el que se considere a sí mismo como un observador en un universo independiente y que sitúe todos los objetos y acontecimientos exclusivamente en el tiempo y el espacio sostiene una concepción mecanicista, en el sentido amplio de la palabra.

Volveremos sobre el problema de lo inmediatamente dado más adelante, en este mismo capítulo.

3.4. El mecanismo falla completamente

La teoría de los *cuantos* pone de manifiesto que no es ya posible localizar con precisión objetos pequeños, tales como electrones; al menos, no lo es por los procedimientos actualmente disponibles. Al exponer la evolución que ha tenido lugar en el terreno de la física comenzamos nuevamente con la forma newtoniana de describir el movimiento. Newton supone que en todo instante, t, puede decirse que una partícula [2] ocupa un punto del espacio y que los puntos que ocupa se sitúan a lo largo de una curva continua. Si se mueve a lo largo del eje x la posición de la partícula x, es una función continua de $t: x=f(t)$. Escribir esta ecuación es afirmar que tiene sentido hablar de una asociación precisa de instantes t con posiciones x.

No vamos a profundizar en el hecho de que toda relación de la forma $x = f(t)$ es una idealización de la experiencia que sólo en un sentido aproximado es verdadera (ningún número finito de observaciones puede especificar exactamente la función f: existen infinidad de funciones, f, en donde acomodar un conjunto finito de observaciones): esto se sabe desde el momento en que empezó la ciencia y no causa perplejidades, pues si se quiere rechazar la descripción referida a funciones continuas en el terreno de la mecánica en atención a que la experiencia no dicta unívocamente tal descripción, es preciso prescindir de toda la física matemática y recurrir a los procedimientos correlacionales del capítulo anterior. Toda descripción de las ciencias deductivas naturales se basa en esta idealización, y nada habría que objetar a ella si la ciencia no hiciera más que describir la experiencia inmediata, cosa que negamos.

Parece entonces que Newton y la totalidad de la física clásica [3] se hallan por completo a salvo de toda posible crítica; pero ésta es una conclusión errónea. Pues, aunque la relación $x = f(t)$ nunca pueda ser completamente *verificada* por medios empíricos, es posible que falle por

---

[2] Un minúsculo trozo de materia: la pequeñez es necesaria para que no se planteen cuestiones tales como la rotación del cuerpo alrededor de un eje.

[3] Los físicos acostumbran considerar como "clásico" todo el campo de la física anterior a la mecánica cuántica (alrededor de 1920). Hasta la relatividad forma parte ahora de la física clásica.

dos razones excelentes: (*a*) la observación puede *contradecirla* directamente; (*b*) la presunción de que la relación existe puede contener incompatibilidades cuando se la confronte con otros hechos. La segunda contingencia, si se presenta, es particularmente perjudicial: pues si se presenta el caso (*a*) es de suponer que se pueda modificar la función f hasta que se logre la concordancia con la experiencia; pero si la relación presenta dificultades que afecten a su significado, como sucedería en el caso (*b*), entonces no hay ninguna esperanza. En la mecánica cuántica nos hallamos enfrentados con la situación (*b*). Un ejemplo servirá para hacer ver con claridad la cuestión. Si se ata a una piedra una cuerda y se la hace girar puede vérsela mover en un círculo, y una relación como $x = f(t)$ representa incuestionablemente nuestra experiencia visual, supuesto que x designe ahora la distancia media a lo largo de la circunferencia descrita: aunque se haga girar la piedra a toda la velocidad que permita la mano, el ojo puede seguirla y verificar así la relación.

Si se une un cuerpo a una rueda que gire a gran velocidad, su movimiento no podrá ya distinguirse a simple vista. La asociación de posiciones exactas con instantes exactos de tiempo —que en adelante denominaremos *descripción clásica*[4]— se convierte ahora en una ligera extrapolación de la experiencia inmediata, pero de una calidad tal que no debe producirnos inquietud, pues existen numerosos modos por los que el cuerpo, aunque aparece a simple vista como una línea circular, puede hacerse visible a efectos de comprobar su posición: cosa que puede conseguirse, por ejemplo, con una iluminación estroboscópica. Si se aumenta la velocidad de rotación acabará por fracasar este método, pero aún serán utilizables algunos otros procedimientos, como la fotografía ultrarrápida: aun cuando el cuerpo describa un millón de revoluciones por segundo, la fotografía "fijará" su posición (más o menos) instantánea.

¿Y si gira 10^8 veces por segundo? Cuando nos encontramos en este orden de velocidades no existe medio alguno de fijar el cuerpo en su movimiento, por lo menos ninguno tan directo como los considerados hasta ahora. Cierto que no puede conseguirse que los objetos de nuestra experiencia inmediata, las piedras por ejemplo, giren así de rápidamente, pero *sí* las partículas cargadas en un ciclotrón. Si los físicos fuesen operacionistas cabales habrían renunciado a la descripción clásica en este punto debido a la falta de procedimientos experimentales para corroborar la asociación de x y t, pero no han hecho tal cosa: se siguieron aferrando a la descripción clásica mucho después de que se conociese esta desdicha experimental.

Ello se debió a que la incapacidad de las técnicas de medición se estimó como cosa puramente accidental: optimistas inveterados, los físicos esperaban que algún día se descubrirían medios que permitiesen

[4] Es ésta una terminología universal entre los físicos, que aplican la palabra *clásica* a todo lo que difiera de las más recientes teorías. Esta palabra se está derrumbando bajo el peso de su carga, que aumenta incesantemente.

medir x en función de t. Y, en su optimismo, fueron presa de la complaciente presunción de que la descripción clásica debe ser siempre eficaz. Ahora saben que ello viola las leyes de la Naturaleza.

Para comprender esto abandonemos la incierta región de las velocidades que rebasan el límite de la detectabilidad directa y descendamos al átomo, donde, según la teoría "clásica" de BOHR, el electrón gira a unas 10^{16} revoluciones por segundo. Las mediciones como tales no pueden confirmar esta cifra; sin embargo, nuestra mente puede imaginar movimientos de este tipo tan fácilmente como se representa la piedra giratoria. Pero, no obstante esta libertad de nuestra imaginación, jamás podríamos ver el electrón, puesto que para ser visto tendría que reflejar o emitir luz, y la luz necesita tiempo para ser emitida o reflejada. El "período de nacimiento" de un rayo de luz ordinario [5] es aproximadamente 10^{-10} segundos, es decir, un rayo de luz tarda unos 10^{-10} segundos en emerger de su fuente. En este tiempo el electrón del átomo de BOHR habría descrito un millón de revoluciones, y lo más que la luz podría decirnos sería que la posición del electrón es una mancha circular.

Aquí comienza uno a preguntarse si no dispondremos de medios obstétricos para acelerar el nacimiento de un rayo de luz. Al intentar hacerlo se tropieza con una dificultad fundamental, conocida de antiguo en óptica pero que no había sido aplicada al extremo que estamos estudiando: reducir el período de nacimiento de un rayo de luz significa acortar la longitud de su tren de ondas, y sabemos por el análisis de FOURIER que acortar el tren de ondas implica ensanchar el espectro hacia frecuencias más altas y más bajas; nuestro electrón, sin embargo, no posee energía suficiente para proporcionar las frecuencias muy elevadas. Dicho de otro modo: ver al electrón en movimiento contradiría las leyes de la física clásica.

La luz no es lo único que deja de decirnos lo que el electrón esté haciendo en x y t: todo otro mensajero imaginable (imaginable dentro del marco de las leyes conocidas de la Naturaleza) queda sorprendido en la misma contradicción y, a decir verdad, en varias otras. Entre ellas figura la conocida interacción entre el mensajero y el electrón mencionada en la sección precedente: la reacción de este último a señales suficientemente enérgicas es lo bastante fuerte como para alterar su movimiento; con lo cual el mensaje mismo quedaría confundido entre lo que era y lo que es ahora el estado de movimiento. Resumiendo: ninguna observación *concebible* podría verificar la relación $x=f(t)$ sin violar las leyes de la Naturaleza. Nos hallamos en presencia, no de una dificultad empírica, sino de una grave incompatibilidad radicada en el corazón mismo de la ciencia.

El físico se ve así colocado frente a un sencillo dilema: o renunciar a las leyes contraventoras o modificar su modo clásico de descripción.

---

[5] Este período de nacimiento es esencialmente la "vida" de un estado atómico excitado. Véase, p. ej., H. E. WHITE: *Introduction to Atomic Spectra*, Nueva York, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1934.

Un atento examen de tales leyes, que incluyen el principio de conservación de la energía, no deja duda alguna respecto a su validez, y las leyes modificadas[6] que se han propuesto para eliminar el conflicto fracasan totalmente. La física se ha visto obligada, por consiguiente, a renunciar a la descripción clásica: ya no resulta adecuado hablar de un electrón atribuyéndole una posición definida en un tiempo definido; la intuición nos engaña cuando insiste en la importancia de esta asociación. Al fin y al cabo, la intuición nos ha engañado frecuentemente antes de ahora: ¿no convenció también a los griegos de que los átomos tienen sabor?; ¿no sugiere en cierto modo que los electrones poseen color? Nos hemos acostumbrado a prescindir del sentido común en estos ejemplos, y tendremos que acostumbrarnos también a la idea de que las partículas no ocupan posiciones únicas en el espacio en momentos determinados.

Una vez cumplida la finalidad que perseguíamos, no es preciso que prosigamos con una detallada exposición de la descripción mecánico-cuantista, que es el tipo actualmente habitual en la física atómica: ya presentaremos dicha exposición en el momento oportuno. Mas, para mantener la imaginación del lector dentro de límites razonables, queremos prevenirle contra ciertas conclusiones.

a. No puede salvarse la descripción clásica diciendo, simplemente, que el electrón es un cuerpo extenso que ocupa muchos puntos diferentes en un tiempo dado. Se han propuesto diversos modelos de un electrón clásico extenso[7], pero ninguno es satisfactorio.

b. No es correcto decir que el electrón posee propiedades que la ciencia no puede comprender. No existen elementos de juicio que apoyen tal especie de misticismo: la mecánica cuántica continúa describiendo el electrón, y su descripción es adecuada, aunque diferente de lo que es habitual, como veremos.

c. Se dice a menudo que todo está bien, siempre que se represente al electrón como una partícula para la mayoría de los efectos, pero como una onda cuando se trate de examinar o analizar su movimiento. Este procedimiento desplaza las dificultades a otra parte y no resuelve nada.

La lección a extraer es sencilla: en las cuestiones básicas debemos *disciplinar* nuestra intuición y apoyarnos más firmemente en el pensamiento abstracto. En esencia, el nuevo análisis omite especificar x como función de t, *pero enuncia la probabilidad,* w, *de que el electrón se halle en* x; y así describe la *mancha:* si, por ejemplo, w es constante, es igualmente probable que el electrón se encuentre en cualquier lugar del círculo; y si w es grande en cierta región, lo más probable es que las medi-

---

[6] Véase el intento de N. BOHR, H. A. KRAMERS y J. C. SLATER [*Phil. Mag.*, 47:785 (1924)] de modificar el principio de conservación de la energía y su refutación por W. BOTHE y H. GEIGER [*Zeits. f. Physik*, 26:44 (1924) y 32:639 (1925)].

[7] ABRAHAM ha desarrollado una teoría que representaba al electrón como una esfera sólida; LORENZ supuso que era una cáscara esférica, y SCHRÖDINGER lo imaginó en cierta época como una nube.

ciones lo encuentren allí. La nueva descripción no implica nada acerca del lugar de un electrón en cada instante, pues se refiere a lo que sucede cuando se hacen las observaciones.

Supongamos que w, cuando se integra sobre el semicírculo superior, tiene un valor de 2/3, siendo su valor sobre el inferior de 1/3. Procedemos entonces de la manera siguiente: se dispone un aparato para determinar si el electrón se halla en la mitad superior o en la inferior de su camino (cosa que puede hacerse sin violar las leyes de la naturaleza, toda vez que no se pretende determinar el momento exacto en que estaba allí); el aparato detectará al electrón unas veces en su arco superior y otras en el inferior. Nuestra función w afirma que se lo encontrará el doble de veces en la parte superior del círculo que en la inferior; en realidad, $w(x)$ no dice siquiera que *estaba* allí, pues se refiere sólo a lo observado: las extrapolaciones, aunque no están prohibidas, implican siempre algún riesgo.

La nueva descripción es menos extravagante que la antigua, ya que es más débil que ella, en el sentido lógico de la palabra: $w(x)$ está implicada por $x=f(t)$, pero no la implica. Por consiguiente, podría computarse la probabilidad mecánico-cuantista si fuese válida la descripción clásica, pero de la descripción mecánico-cuantista (probabilística) no puede inferirse una asociación exacta de x con t. La física clásica, aunque abundantemente alimentada por nuestra afectuosa imaginación, desarrolla su vida en un ambiente cerrado y aboca a esa deficiencia vitamínica que sobreviene a las teorías cuando se retiran a sí mismas de la observación. Este es el diagnóstico epistemológico exacto.

Afortunadamente, la dolencia citada no constituye, a efectos prácticos, obstáculo alguno para el paciente; pues cuando la mecánica cuántica se aplica al movimiento de los objetos ordinarios, queda claro que produce los mismos resultados que la física clásica. Prácticamente, por lo tanto, esta última disciplina conserva su energía vital porque es una buena aproximación a la forma correcta de descripción; ello explica sus éxitos. Pero no debe olvidarse que, en un sentido básico, una piedra obedece a las mismas leyes y se halla sometida a la misma clase de incertidumbre que un electrón en lo que se refiere a su posición instantánea. Ahora bien, la cantidad de incertidumbre, al ser inversamente proporcional a la masa en movimiento, es mucho más pequeña: Mientras que nos era imposible localizar al electrón en toda la amplitud de su órbita, nuestra incapacidad para localizar la piedra se limita a una región tan pequeña que resulta insignificante [8].

La física moderna es una recusación de la suficiencia universal del sentido común, y previene contra una aceptación demasiado fácil lo

---

[8] La masa de una piedra de un kilo [dos libras] viene a ser 10^{30} veces mayor que la de un electrón. Mientras que la incertidumbre en la posición del electrón dentro de un átomo se extiende a 10^{-8} centímetros, la incertidumbre correspondiente en la posición de la piedra se limitaría a una región de 10^{-38} centímetros, que nunca podríamos observar directamente. Véase el capítulo XVIII.

que, según se dice, "nos revelan" los sentidos. Por esta razón, las precedentes consideraciones tienen gran repercusión en el problema de que tratamos en el presente capítulo: el carácter de lo inmediatamente dado en la experiencia[9].

3.5. La teoría de los conceptos auxiliares

El físico ha realizado su elección al rechazar como básicamente incorrecta la descripción clásica del movimiento, pero el filósofo no siempre ha estado dispuesto a seguirle; y la renuencia de este último, reforzada por las lisonjas del sentido común, se ve ayudada y estimulada por el físico, que, cuando habla como filósofo, parece un físico clásico. La mejor manera de exponer la confusión de la situación actual es valiéndose de un breve diálogo. Un físico teórico, después de haber resuelto un problema de mecánica cuántica, cuenta a su amigo filósofo lo que ha descubierto. Este objeta:

— ¡Santo cielo! No lo dirás en serio: todos sabemos que los fenómenos tienen lugar de forma continua en el espacio y en el tiempo. Tus resultados no pueden ser verdaderos.

A lo que el físico responde:

—¡Ah, claro! Me alegro de que me hayan indicado eso: desde luego, debes de tener razón, pues si lo dices es que lo sabes muy bien.

Entonces empieza a medir sus palabras para complacer a su amigo. Pero continúa desarrollando la ecuación de Schrödinger.

Luego, nuestro filósofo lo piensa mejor: no puede olvidar por completo el embarazo del físico, e inventa, pues, la teoría de los *conceptos auxiliares,* la cual sostiene que la ciencia, liberada de la esclavitud de la experiencia sensible, no describe ya la realidad, sino que forma "modelos" de realidad que sirven solamente a efectos de explicación y cálculo. Son lo que los alemanes han denominado *Rechengrössen,* magnitudes o entidades útiles para el cálculo y la predicción. Nadie negará su utilidad, pues nos permiten escabullirnos mentalmente detrás de la realidad y jugar al escondite con ella. En su forma extrema, tal es la concepción de Mach, que consideraba todas las entidades no perceptibles (por ejemplo, los átomos) como artefactos, como conceptos auxiliares no relacionados con las impresiones de los sentidos. Aceptándola, nos aseguramos de que todo está bien; el electrón y todas las demás entidades invisibles de la física moderna son ficciones de la imaginación.

Esta es la forma extrema de la teoría de los conceptos auxiliares, que es la más sostenible, y la menos generalmente admitida en la actualidad. Su forma más moderada, que cuenta con numerosos adeptos

[9] Experiencia, en la terminología de este libro, es *toda* experiencia e incluye el pensamiento, la conjetura y el sentimiento, así como la sensación. Mas la palabra *empírico* se utiliza en el sentido habitual, como opuesto a racional.

tanto entre los filósofos como entre los físicos, aplaca a la ciencia admitiendo que los electrones, fotones, protones, mesones, al tener cualidades perceptibles, son, ciertamente algo más que *Rechengrössen* y pertenecen a la "naturaleza"; se vuelve luego en la otra dirección y proclama que nuestra descripción, al desviarse del recto y estrecho sendero clásico, es más o menos subjetiva y, según es de presumir, no definitiva. De acuerdo con esta concepción, el físico, al abandonar la forma clásica de descripción, se permite un desliz metodológico que le lleva al terreno de la imaginación; ahora bien, se ve obligado a hacerlo —así sostiene este enfoque— debido a su ignorancia o a que sus métodos de observación no son suficientemente pormenorizados. Pero el físico rehabilita su condición científica admitiendo y lamentando a la vez su desliz. Esta equívoca actitud no merece comentarios sino una condena.

Si existe algo característico e incontrovertible en los procedimientos de la física moderna es el hecho de que la descripción mecánico-cuántica es *más fiel a la naturaleza de los electrones* que la clásica asignación de x a t. Y HEISENBERG, DIRAC, SCHRÖDINGER y BOHR sólo abandonaron esta norma usual porque querían permanecer fieles a la observación. Todo el que cree la parte de la física que explica el movimiento de las piedras y los planetas y critica, sin embargo, la teoría del átomo porque es demasiado abstracta es culpable de superchería; pues se esfuerza por imponer al método científico los rasgos familiares de su mundo escolar, rehusando aprender de nuevo. Si se confía en lo que la ciencia dice acerca de la piedra en movimiento debe creerse también lo que diga acerca del electrón. El sentido común es algo muy dócil; se le puede educar para que considere como evidentes ésta y otras cosas aún más extrañas; el sentido común sigue a la ciencia, nunca la guía.

3.6. LO DADO ES INTERIOR A LA EXPERIENCIA, NO EXTERIOR A ELLA

Hemos comenzado este capítulo concibiendo al hombre como espectador del universo, y hemos reconocido que la polaridad espectador-espectáculo se convierte en un obstáculo para una comprensión total, al advertir que el mecanismo, en cuanto estructura formal y poder impulsor del espectáculo, tendía a perder validez por su incapacidad para incluir al observador. Por fin, hemos podido ver detenidamente cómo el carácter de lo que el espectador creía estar percibiendo (a saber, el sagrado complejo espacio-tiempo-materia) degeneraba en probabilidades de percepción. El espectáculo ha comenzado a envolver al espectador. Con estos conocimientos previos nos enfrentamos ahora con el problema al que tanto hemos tardado en acercarnos: ¿de qué índole es lo inmediatamente dado?

Admitamos un simple hecho: debe buscarse *dentro de la experiencia.*

Carece por completo de justificación *comenzar* una teoría del conocimiento con la premisa ontológica que caracteriza la distinción espectador-espectáculo. En caso de que la experiencia, tras un análisis adecuado, invista de significado esa distinción, estamos dispuestos a aceptarla, pero aún entonces sólo como propiedad del contenido de la experiencia, actual o posible. No niego que el árbol que se alza ante mi ventana sea un árbol real —real en un sentido que requiere aclaración—, un árbol que puede ser visto, tocado, escalado o talado; pero me niego a saltar desde este árbol a otra entidad existente trás él, una entidad que me "haga" tener estas experiencias. Esta restricción es apropiada en toda la ciencia y toda la epistemología: la ciencia física no necesita ningún mundo fantasmal más allá de aquello a lo que se refiere.

Tal vez perciba aquí el lector una actitud poco amistosa hacia la metafísica, cierta propensión al positivismo. Pero no es seguro que hayamos de comportarnos de acuerdo con este prejuicio, ya que más adelante se encontrará una buena cantidad de metafísica en el presente libro; parece, no obstante, imprudente en grado sumo hacer una suposición metafísica especialmente violenta, la del realismo trascendental, ya desde el mismo principio, antes de dar comienzo a la investigación, y establecer una limitación *a priori* a todos los métodos que empleemos. Si resultara que la ciencia se torna imposible o difícil, si la experiencia no pudiese suministrar una base estable para un mundo objetivo desde dentro de sí misma por medio de métodos inmanentes, sí nos veríamos obligados a emprender el salto metafísico inicial. Pero esperamos demostrar que tal cosa es innecesaria.

Quienquiera desee lanzarse a ese salto puede, sin embargo, seguir con nosotros, pero solamente bajo una condición: no debe atribuir acríticamente a los elementos trascendentales del universo aquellas propiedades sintéticas que muestra mente es demasiado propensa a conferirles, tales como existencia en el espacio y el tiempo del sentido común, sustancialidad, etcétera. En cambio, puede aceptar el *Ding an sich* kantiano si así le place. El autor prefiere *comenzar* su viaje sin estorbos metafísicos y adquirirlos en ruta cuando sean necesarios.

Acabamos de insistir en que lo dado ha de buscarse dentro de la experiencia, y no, desde luego, dentro de la mente. Un estudio cuidadoso de la experiencia hará que aparezca cualquier elemento mental que haya; es un fatal error, pues, desplazarlo de su contexto y llevarlo al principio de toda investigación, convirtiéndolo así en una espinosa singularidad en el campo de la experiencia, sin utilidad ni significado algunos. La concepción lockiana, con sus substancias materiales y mentales, es un intento típico de soslayar estas dificultades: mas fracasa porque crea un dualismo, un sistema en el que la dificultad ha sido convertida en ley. NORTHROP [10] pone de relieve que la filosofía de LOCKE es una

[10] F. S. C. NORTHROP: *The Meeting of East and West*, Nueva York, The Macmillan Company, 1946.

secuela natural de la física de NEWTON; lo cual proporciona tal vez la perspectiva más clara en que puede mirarse la epistemología de LOCKE e indica al mismo tiempo sus limitaciones científicas.

La ubicación no es una de las propiedades de la mera experiencia, aunque los elementos que la integran pueden tener ubicación o no tenerla. Nunca, por tanto, es necesario decir *dónde* está la experiencia; y tampoco existe nada *exterior* a ésta, pues tal atributo espacial sólo puede ser, en el mejor de los casos, una metáfora. Al decir esto, sin embargo, no renunciamos a lo que suele designarse por "objeto exterior", si se entiende correctamente esta expresión: el adjetivo *exterior* es, en realidad, gratuito, añadido tal vez para dar énfasis a la expresión, pero no con deliberación metafísica, e implica una cualidad peculiar a ciertas cosas *de* nuestra experiencia. Denominaremos *objetividad* a esta cualidad y vamos a encontrar, en efecto, sitio sobrado para ella, toda vez que las reglas que atestiguan lo que en las cosas es objetivo constituyen una parte muy importante de la epistemología que aquí presentamos. El problema de la exterioridad se convierte así en el problema de la objetividad.

Su capacidad de investir de significado a la objetividad es lo que evita que el presente análisis nos lleve a parar al idealismo berkeleyano. El error de BERKELEY fue considerar la experiencia como carente de significación en sí misma, necesitada de una estabilización trascendente, cosa que conseguía haciendo que fuese el pensamiento de Dios. Para KANT, por el contrario, la significación es un elemento esencial de la experiencia, un elemento que nace con ella y que está unido *a priori* y en diferente medida a sus distintas partes. Lo que queremos resaltar es que la experiencia no posee una significación predeterminada ni carece en absoluto de ella: la significación es algo que ha de ser determinado en su interior, debe ser descubierto por medio de procedimientos que todos conocen vagamente y que alcanzan la máxima precisión en los métodos de las ciencias teoréticas. Sólo de este modo puede evitarse la dificultad que HUSSERL formulaba a KANT preguntando por qué no ha de permitirse que todos los contenidos claros de conciencia compitan con los datos de los sentidos en la tarea de determinar la realidad.

3.7. LOS DATOS DE LOS SENTIDOS

Tratemos ahora de encontrar lo inmediatamente dado, una vez definido el campo dentro del cual ha de buscarse. ¿Qué es una percepción sensorial cuando no se la interpreta como un mensaje enviado por lo incognoscible? Es simplemente un elemento de la experiencia que se distingue de otros por su *espontaneidad,* por su relativa *independencia* de los demás elementos, por su *irreductibilidad.* La certera expresión de KANT, "la rapsodia de las percepciones" lo describe bien. La parte sensible de mi experiencia al ver un árbol es el residuo que per-

manece cuando se eliminan de esa experiencia todos los aspectos racionales y todas las asociaciones mnemotécnicas; este residuo no puede ser suscitado a voluntad: puede ser pensado o representado en la memoria y, sin embargo, se declara a sí mismo inequívocamente diferente del pensamiento y de la representación. Puede ser el origen de un pensamiento y el fin de una expectativa. Siendo el irreductible residuo de la experiencia, escapa a la manipulación racional, y ésta es la razón por la que los puros elementos de la percepción sensible, tales como el azul del cielo según se la aprehende de pasada, la fragancia de la flor o la forma vista de esta mesa, nunca pueden figurar por sí mismos en las teorías físicas: es preciso traducirlos a longitudes de ondas, componentes químicos y figuras geométricas; deben ser "racionalizados" antes de recibir un tratamiento científico. De hecho, deben ser racionalizados antes de que puedan ser examinados en absoluto, y en este sentido son verdaderamente inmediatos (pues residen a ese nivel de la experiencia que desafía al análisis), si bien no forman parte de un estrato de significación que trascienda a la experiencia.

Hoy otro modo de expresar esta misma cuestión: la percepción sensible no interpretada es el componente completamente *pasivo* de la experiencia. (Se puede, naturalmente, ser pasivo y, sin embargo, estar sumamente alerta: una actitud de expectación unida a la fase pasiva puede envolver los datos de los sentidos de un tejido de relaciones racionales, pero no los hace racionales en sí mismos.) Reconociendo, precisamente, esta sensación de pasividad, tiende el lenguaje a describir los datos de los sentidos en voz pasiva: estamos siendo asaltados, se nos está dando; la misma palabra *dato* refleja esta tendencia. Desgraciadamente, no siempre es fácil de vencer la tentación de insinuar la presencia de un "donante" ulterior; y el realismo tradicional de la "sustancia" encuentra un aliado en los hábitos lingüísticos. Para evitar el deslizamiento hacia la epistemología podría muy bien reemplazarse la palabra *datos* por *hábitos,* pero nos inclinaremos ante la costumbre (urgiendo al lector para que tome una clara decisión en este punto) y continuaremos empleando "datos".

Igualmente seductora es la palabra *presentación,* que parece sugerir la aparición o bien de un recién llegado desconocido que nos hubiera sido dado cortésmente por la naturaleza o quizá de un letrero con un mensaje súbitamente alzado ante nosotros al extremo de una larga pértiga, cuyo otro extremo no sea visible. La única virtud del término presentación radica en la facilidad con que lo podemos relacionar verbalmente con *representación,* la repetición activa de los datos en la memoria.

Ni la propiedad de ser espontánea, ni la de ser pasivamente encontrada separa la impresión sensible de ley de otras cosas, como el dolor súbito, los sueños, las alucinaciones y las ilusiones ópticas: éstas son o pueden ser tan irreductibles, tan claras y vívidas como la imagen del sol en el cielo, y su percepción no tiene por qué quedar confinada a

una sola persona; por lo tanto, no hay que excluirlas de la clase de datos de los sentidos. El que sean o no importantes, significativas, es otra cuestión; pero la significatividad, sin embargo, no es una característica indeleblemente estampada en lo revelado por los sentidos y no puede, por consiguiente, determinarse por referencia exclusiva a los datos sensibles: el dominio de lo inmediatamente dado se divide en lo que es válido y lo que no lo es apelando a principios que, por su parte, no están proporcionados por los sentidos. Pero de esto hablaremos más adelante.

Si lo inmediatamente dado está definido por los atributos de espontaneidad y de cierta pasividad que caracteriza su incidencia, si no es más que aquello que, dentro de la experiencia, se proclama poseedor de un carácter propio, entonces no nos es lícito limitar su extensión a lo que se denomina percepción sensible en sentido estricto. Debemos, en efecto, incluir todas sus manifestaciones, las sensaciones ordinariamente consideradas como objetivas (ver el árbol), así como la presentación afectiva de temor en una experiencia religiosa. La razón por la que solemos destacar aquéllas como impresiones de los sentidos por excelencia es que la ciencia ha desarrollado un formalismo universalmente aceptado para la racionalización de los datos, formalismo por medio del cual puede certificarse la objetividad de éstos; en cambio, para el segundo tipo de experiencia inmediata no se ha logrado hacerlo a tan gran escala.

Queremos hacer notar, finalmente, que el uso del singular, dato, no es nada feliz. Lo que encontramos en la experiencia puramente sensible es inefablemente complejo y múltiple, y todo intento de dividirlo en partes individuales es artificial, arbitrario: cuando dividimos el árbol en tronco, ramas y hojas no estamos efectuando una disección de un grupo de datos de los sentidos (árbol) en una serie discontinua en la que un dato sucedería a otro, sino que estamos dividiendo el objeto en partes. La inmediatez denotativa del árbol sensorial puede descomponerse de modo vago en "firme, oscuro, redondo, recto", "piezas verdes que se mueven", etcétera, pero no puede atribuirse individualidad ni unidad a ninguna parte de él.

El estudio precedente está lejos de ser completo en cuanto exposición de la experiencia: por lo pronto, ignora los factores afectivos y volitivos, y dice poco acerca del juicio y la acción. Tal vez más adelante se presente ocasión adecuada para tratar de ello, por lo que no debe interpretarse nuestra omisión en este momento en el sentido de que queramos menoscabar la importancia de tales factores en la experiencia: ciertamente, desempeñan un papel secundario en la ciencia física, pero constituyen una ayuda inestimable para enlazar la ciencia con todo el conjunto de la actividad humana. En segundo lugar, nuestro estudio ha rehuído abordar un punto más bien crítico: "*¿De quién* es la experiencia que describe, de usted o mía?" Acaso parezca que deja al autor hundirse en la ciénaga del solipsismo, en donde solamente puede pedirse socorro

a sí mismo. Es posible que al llegar a este punto la tentación de extraer tal conclusión sea verdaderamente grande, pero ruego al lector que aplace su decisión, pues más adelante encontraremos criterios únicos para discernir lo objetivo de lo no objetivo, y en toda experiencia hay sitio sobrado para que los objetivos sean experimentados. Entretanto, sólo puedo confiar en haber descrito correctamente cierta parte limitada de ambas experiencias, la de usted y la mía.

Resumen

El capítulo tercero está dedicado en su mayor parte a temas de los cuales se ha alimentado durante siglos la polémica filosófica. Son elementales, y muchas personas estiman que se hallan por debajo del nivel que en la actualidad se requiere para que sean filosóficamente interesantes: plantean cuestiones que no son plenamente científicas, cuestiones —sin duda— que no admiten la aplicación de las técnicas del empirismo moderno. En el punto central de nuestra investigación se halla el problema de lo que esté inmediatamente dado en la experiencia.

Importa mucho que se vuelva sobre tales cuestiones, pese a su impopularidad en el momento actual. Hace veinte años el físico estaba dispuesto a considerarlas bizantinas e inútiles, promotoras de ociosas especulaciones entre los filósofos; sin embargo, a partir de entonces, él mismo ha desenterrado los huesos de viejas disputas: sus teorías cuánticas han vuelto a plantear los mismos problemas que él consideraba bizantinos. Así, la teoría de los *cuantos* carece de significado sin una clara comprensión de qué es precisamente lo inmediatamente dado; pues si al investigador físico le fuesen innegablemente *dados* hechos tales como la posición y la velocidad de las partículas —por citar un famoso ejemplo— ¿cómo podría el principio de incertidumbre negar su observabilidad bajo cualesquiera circunstancias? Si el tiempo estuviese inmediatamente dado en la sensación ¿cómo podría el físico elaborar teorías que configuren el tiempo según abstractos modelos matemáticos? La ciencia natural moderna presenta muchos de estos desafíos, que desbaratan la complacencia de los que creían haberse emancipado de los debates de la "filosofía de las aulas".

Animados de estas convicciones, hemos examinado la concepción mecanicista de la naturaleza, en la que el observador —o tal vez su mente— se halla expuesto al espectáculo de los sucesos externos. Hemos visto que es difícil mantener la relación espectador-espectáculo ante los conocimientos más recientes de la ciencia, sobre todo porque el sujeto cognoscente se inmiscuye inevitablemente en el esquema objetivo de las cosas; y la teoría de los conceptos auxiliares, que hemos bosquejado someramente, no disculpa la falsa distinción espectador-espectáculo, de modo que se hace patente que ha de comenzarse de nuevo. Hemos indicado que el punto de partida correcto es un análisis de *toda* expe-

riencia. Luego estudiamos superficialmente el tipo más sencillo de experiencia, esto es, la experiencia inmediata, o los datos de los sentidos, y mostramos con breves rasgos cómo funciona en cuanto término del conocimiento.

BIBLIOGRAFIA

BLANSHARD, B.: *The Nature of Thought,* Nueva York, The Macmillan Company, 1940.

D'ABRO, A.: *The Decline of Mechanism,* Nueva York, D. Van Nostrand Company, Inc., 1939.

DARWIN, C. G.: *The New Conceptions of Matter,* Londres, George Bell & Sons, Ltd., 1931 [vers. cast.: *Las nuevas concepciones de la materia,* Madrid, Aguilar, 1935].

HUSSERL, E.: *Ideas,* Nueva York, The Macmillan Company, 1931 [ed. orig. y vers. cast. citadas].

JAMES, W.: *Principles of Psychology,* Nueva York, The Macmillan Company, 1910 [vers. cast.: *Principios de Psicología,* Buenos Aires, 1945].

LOVEJOY, A. O.: *The Revolt Against Dualism,* Nueva York, W. W. Norton & Company, 1930.

MACH, E.: *The Analysis of Sensations,* The Open Court Publishing Company, La Salle, Ill., 1914.

PLANCK, M.: *The Universe in the Light of Modern Physics,* Leipzig, J. A. Barth, 1938.

PRICE, H. H.: *Perception,* Londres, Methuen & Co., Ltd., 1932.

REICHENBACH, H.: *Experience and Prediction,* Chicago, University of Chicago Press, 1938.

RUSSELL, B.: *An Inquiry into Meaning and Truth,* W. W. Norton & Company, Nueva York, 1940 [vers. cast. *Investigación sobre el significado y la verdad,* Buenos Aires, 1946].

RUSSELL, B.: *Our Knowledge of the External World.* The Open Court Publishing Company, La Salle Ill., 1914 [vers. cast.: *Nuestro conocimiento del mundo exterior*].

SANTAYANA, G.: *Realms of Being,* Charles Scribner's Sons, Nueva York, 1942.

CAPITULO IV

EL APARTAMIENTO DE LO INMEDIATO; LAS CONSTRUCCIONES INTERPRETATIVAS

4.1. La continuidad entre lo espontáneo y lo reflexivo [1]

Se piensa a menudo en los datos como tipos de experiencia que apuntan más allá de sí mismos; y se supone que en virtud de este trascendente encadenamiento los datos disfrutan de una posición en el esquema de la realidad, con una estabilidad y un significado exclusivamente propios. Esta idea ha creado, como es natural, la ilusión de que existe una señalada fisura dentro de la experiencia entre los datos sensibles (que serían partes de lo inmediatamente dado), por un lado, y representación, abstracción y pensamiento, por otro; y, por consiguiente, los datos se distinguirían fácilmente de los conceptos.

En nuestra opinión, que anima a la experiencia a caminar sobre sus propios pies y le niega el uso de muletas ontológicas, y que, por lo tanto, nos obliga a buscar el sentido y la significación dentro de nuestros propios procedimientos cognoscitivos, la diferencia entre hecho sensible y pensamiento no aparece tan clara. Vamos a sostener que la sensación, en cuanto parte del proceso de conocimiento, no es totalmente *sui generis,* y que el tránsito desde las cualidades que expresan un acto de clara percepción hasta las que caracterizan el puro pensamiento puede muy bien ser gradual.

Primeramente, sin embargo, conviene adelantarse a un posible malentendido. Al afirmar tal gradación continua no nos estamos refiriendo solamente a la continuidad psicológica: los testimonios psicológicos están, efectivamente, a favor nuestro; pero queremos decir además que un análisis de lo inmediatamente dado y de los conceptos racionales como partes metodológicas del proceso cognoscitivo (o de la lógica en su sentido amplio) revelará elementos comunes a ambos dominios.

El carácter coercitivo de lo dado, cuando no se interpreta como una mística huella de lo real, se resuelve en la espontaneidad y pasividad de la experiencia, como ya se ha puesto de manifiesto, y estas cualidades no son completamente peculiares de la percepción sensible: se puede

[1] Los argumentos que presentamos en esta sección son rudimentarios e incompletos. Para un análisis cuidadoso y competente de todas las cuestiones que entran en la tarea que nos ocupa, si bien enfocado desde puntos de vista filosóficos distintos del nuestro, véanse los dos volúmenes de B. Blanshard: *The Nature of Thought,* así como la obra de C. I. Lewis: *An Analysis of Knowledge and Valuation,* La Salle de Ill., The Open Court Publishing Company, 1947.

disertar elocuentemente y, en general, sensatamente, acerca de los objetos de la percepción en cuanto contrapuestos a los conceptos; sin embargo, el orador se queda perplejo cuando se le pregunta, por ejemplo, si la igualdad de tamaño de dos objetos, fugazmente percibida en una ojeada casual carente de propósito crítico, es una cosa u otra. Por una parte, muchos *conceptos* poseen aspectos sensorio-empíricos a causa de su referencia a lo inmediatamente dado (en realidad, a esta circunstancia empírica del pensamiento le han atribuido un carácter fundamental el empirismo británico y algunos de sus modernos sucesores), y por otra aparece completamente claro que los *datos sensoriales* exigen conceptos para su interpretación. Arrancado de su contexto en la experiencia, lo inmediatamente dado resulta tan grotesco como lo ha sido frecuentemente su contrapartida, lo racional, cuando se lo ha mantenido aislado. Salvo que tengamos gran cuidado en no alterar el natural engarce de datos y pensamiento, haremos una filosofía artificial y, ciertamente, no representativa de la ciencia.

Admitamos, pues, lo que es evidente: un acto de percepción puede estar fuertemente lastrado por lo inmediato (yo puedo recrearme soñadora o alegremente en los inefables e indefinidos aspectos de las nubes que vagan por el firmamento iluminadas por la luz del sol) o puede hallarse preñado de relaciones racionales, como cuando miro la vibración de un galvanómetro sobre un limbo graduado esperando la confirmación de una predicción causal. Asimismo, un concepto puede ser tan abstracto que no suscite respuesta alguna del mundo de los datos, como por ejemplo la idea de una matriz unitaria o de un operador diferencial, o puede hallarse acentuado por el lado intuitivo, como el concepto de hombre o de árbol. Nosotros creemos que la experiencia puede moverse de modo continuo entre los cuatro, que existen partes *típicamente* racionales y partes *típicamente* sensoriales del conocimiento, y que es erróneo atribuir a la mente, en cuanto receptáculo de la experiencia, una facultad especial de percepción [2] y otra de raciocinio. Ciertamente, los conceptos y lo simplemente percibido pueden distinguirse en general, y continuaremos considerándolos discernibles; pero constituyen meramente tipos extremos de actividad, o resultados de actividades integrantes del proceso del conocimiento.

La mayor parte de esta actividad se desarrolla en el campo de los conceptos; lo que es inmediatamente dado en la sensación reposa, figuradamente hablando, en una delgada capa límite o en un plano limitador de la experiencia. Poseemos la facultad de pasar desde allí hasta cualquier punto situado entre los conceptos, todo lo lejos que queramos del plano limitador. En las secciones 4,3 y 4.4 veremos la manera de hacerlo.

---

[2] Con el término *percepción*, usado sin matizar, pretendemos emplear un sinónimo de sensación, consciencia sensorial, etc. Puede designar el contenido del acto perceptivo, así como el acto mismo, estando incluidos ambos aspectos de la experiencia en la concepción que defendemos. Para distinciones más sutiles, véanse BLANCHARD o LEWIS, *op. cit.*

4.2. La bruma de lo inmediatamente dado

El hecho de la continuidad entre los elementos espontáneos y reflexivos de la experiencia tiene gran importancia en la lógica. A medida que un concepto se aproxima a lo espontáneo surgen dificultades para dar una definición precisa y explícita de él. En cambio, una pura abstracción es siempre fácil de definir, según puede verse en el ejemplo del concepto matemático de grupo: su definición es completa y adecuada, pues nunca existe duda alguna respecto a si un conjunto de cantidades forma o no un grupo. Las cosas denotativamente dadas, por el contrario, eluden siempre una definición precisa: cuando hay que incorporarlas a un sistema lógico o bien funcionan como elementos no definidos o si no debe hacerse una generosa concesión a las incertidumbres. Así, si definimos el perro como un mamífero de cuatro patas y numerosas otras características, todas las cuales se especifiquen, surge una dificultad al encontrar un perro con tres patas.

Esta intrínseca dispersión lógica existe en todas las partes de lo inmediatamente dado, *y es importante que esto se reconozca claramente.* Debido a ello, puede estimarse discutible si la lógica formal podrá jamás adentrarse en los elementos espontáneos de la experiencia lo suficiente como para dar una explicación satisfactoria de los mismos; en todo caso, es evidente que una investigación epistemológica como la presente no necesita detenerse en definir exactamente qué es lo que designa por términos tales como *acto de percepción* y *concepto,* o lo *espontáneo* y *lo racional,* tarea que en realidad no puede abordar. Volveremos a encontrar más adelante esta misma penumbra de significado (cf. el cap. VI).

Si la concepción que estamos exponiendo es correcta, tiene que producir importantes efectos sobre el significado de la realidad, y permitirá que se extraiga una provechosa lección. La experiencia espontánea es más rica que la lógica, indudablemente, pero es también más rica que el lenguaje, que es una forma primitiva de la lógica. Es posible simbolizar adecuadamente lo racional, bien sea mediante el lenguaje ordinario o de otro modo distinto, pero lo inmediatamente sentido pierde su plenitud en la expresión. Y de nuevo viene a las mientes la metáfora de una penumbra; pues el proceso de traducir la experiencia al lenguaje puede compararse a la proyección sobre una pantalla de sombras de objetos: un foco luminoso puntual proyecta sombras nítidas y geométricas, uno amplio hace que cada sombra esté rodeada por una región brumosa, de penumbra; pues bien, es como si el foco luminoso aumentara de tamaño a medida que avanzamos desde la experiencia reflexiva hasta la espontánea o sensible.

Ahora podemos juzgar adecuadamente la transición del significado al lenguaje y de éste a la lógica. Algo vital se ve sacrificado en cada uno de los pasos que dicha transición implica, y esa pérdida alcanza su grado máximo en el terreno próximo a la percepción. Por ello es por lo que el

positivismo lógico, en tanto en cuanto se confina a un análisis del lenguaje científico, no puede nunca hacer completa justicia a la ciencia; debe hablar siempre de proposiciones, allá donde el científico se interesa por significados anteriores a las proposiciones.

4.3. El paso desde los datos hasta el conocimiento metódico

En este punto, el lector puede llegar a una conclusión sumamente desfavorable para los objetivos de este libro: que la posición del autor, en la medida en que difiere del positivismo, lo hace abrazar un misticismo. Y tal vez parezca que no vale la pena seguir leyendo un libro si, en sus líneas argumentativas, el autor admite abiertamente que habla imprecisa, brumosamente, al definir algunos de los términos que utilice. Pero rogamos indulgencia al lector y le pedimos que considere dos cosas: primera, que el franco reconocimiento de la existencia de incertidumbres lógicas fundadas en la naturaleza de la experiencia, no introducidas por propia negligencia, lo que hace es ahuyentar más que crear el misticismo; y segunda, que el lector, en el grado en que su experiencia sea más rica que nuestro lenguaje, puede reconstruir los nítidos contornos de los significados partiendo de brumosos bosquejos. Así, podemos perfectamente decir que sabemos qué es un perro aunque no seamos capaces, tal vez, de definirlo, que comprendemos la diferencia entre un burro y un caballo, aunque tal vez la mula nos desconcierte. De forma parecida, podemos dar por sentada la diferencia entre lo racional y lo inmediatamente sentido en nuestra propia experiencia, pese a la existencia de regiones en que ambos se presentan fusionados; y, sobre todo, sigue teniendo significación preguntar cómo pasamos de uno a otro. Es este tránsito lo que recientemente ha preocupado a Eddington y a otros muchos autores para quienes es difícil hallar sentido a la afirmación enunciada por los físicos de que un objeto físico, tal como es revelado por los *sentidos,* posee elementos constitutivos (átomos, electrones, fotones latentes, etc.) cuyas propiedades están descritas por *abstracciones matemáticas.* Existe aquí un problema del que la filosofía tradicional no siempre se ha percatado plenamente.

El tránsito en cuestión, aunque no brusco, tiene, sin embargo, su punto de partida en la percepción sensible y finaliza entre elementos del conocimiento metódico, poniendo así en correlación fragmentos de experiencia[3] pertenecientes a especies distintas. Su forma más simple es el acto de cosificación que asocia a los diversos aspectos efímeros del árbol visual el objeto público "árbol"; con frecuencia se suele describir erróneamente este proceso como una síntesis o una integración de cualidades o relaciones inmediatamente percibidas; mas, en realidad, es mucho más que esto, ya que el objeto intencional "árbol" implica una infi-

[3] En cuanto a nuestro significado de experiencia, véase nota 9, pág. 51.

nitud de aspectos que no están dados en la sensación. WERKMEISTER [4], aunque plegándose a la tradición en su empleo de los términos *síntesis* e *integración,* habla en su pasaje más meticuloso de una "complementación imaginativa" de lo perceptualmente dado. Las escuelas kantiana y neokantiana se dieron perfectamente cuenta de esta distinción, y gran parte del hincapié que hicieron sobre esta cuestión es ahora indispensable como condición para comprender la ciencia moderna. No obstante todo ello, no abrigamos la intención de seguir a los kantianos más allá de su claro reconocimiento de una importante distinción, hasta lo que parece ser una insostenible posición de trascendentalismo, con su inherente dicotomía de mente y naturaleza.

Cerciorémonos de que comprendemos la diferencia entre el árbol visto y el objeto físico árbol. Las impresiones visuales, táctiles y cinestésicas que componen el primero quedan complementadas por dos clases de cualidades cuando se produce el conocimiento del árbol objetivo. La primera de ellas hace referencia a sensaciones, aunque no a sensaciones presentes en forma actual; pues lo inmediatamente dado no comprende sino unos cuantos aspectos espaciales del árbol en un momento determinado (se ve un lado de la superficie, se tocan partes de la superficie, se encuentra que el tronco es sólido, etc.), y estos diversos aspectos pueden ser integrados: podemos mirar a diferentes sitios y reunir en una sola impresión sintética los distintos fragmentos de percepción. Carece de importancia que digamos que en esta fase hemos rebasado ya la evidencia de lo inmediato; afirmarlo sería, en realidad, una artificial limitación del campo de los datos de los sentidos: la transición, como ya hemos hecho notar, es de carácter gradual. Pero no nos detenemos aquí: recurrimos a la memoria y atribuimos al árbol un interior que no vemos en el momento de la observación, un interior que presenta una tonalidad parda a la vista y una consistencia dura al tacto, aunque de momento no se halle expuesto a ninguno de esos dos sentidos; suponemos que tiene raíces, que podrían hacerse visibles si se cavara la tierra en su derredor, y un tejido vascular cuya savia escurriría si se le rompiese la corteza. Todas estas propiedades podrían denominarse integrativas, toda vez que resultan de la adición de una multitud de percepciones recordadas; sin embargo, no constituyen el árbol objetivo.

Porque lo que ocurre es que éste es el conjunto de todas las propiedades, incluyendo las no recordadas y las no conocidas. NATORP y CASSIRER han señalado a menudo este hecho sirviéndose de un artefacto lingüístico alemán que, desgraciadamente, pierde en castellano su poder sugerente: un objeto, dicen, no es *gegeben,* sino *aufgegeben;* no es "dado" en el sentido usual de la palabra, sino "planteado" como problema. Prescindimos por el momento de todas las misteriosas implicaciones de esta fraseología que da tanto que pensar y centramos nuestra atención

[4] W. H. WERKMEISTER: *A Philosophy of Science,* Nueva York, Harper & Brothers, 1940, pág. 103.

en lo que claramente significa, en el carácter *conceptual* del árbol objetivo. Esto nos hace toparnos con la segunda clase de cualidades anteriormente mencionada, aquélla que es algo más que una abstracción obtenida de la percepción sensible o una integración de la misma: esta clase incluye la notable propiedad de la permanencia, o continuidad de existencia, que jamás podría ser abstraída a partir de los datos, pues una secuencia finita de impresiones perceptivas no puede dar origen a una continuidad, como tampoco un número finito de puntos puede engendrar una línea.

El acto de cosificación de datos implica algo más que integraciones: implica *construcción,* construcción conforme a unas reglas; y la objetividad emerge como resultado de este procedimiento: afirmar la objetividad es nuestra forma de reconocer el éxito del paso desde los datos hasta la totalidad racional de los objetos construidos. Pero esto no significa que hayamos resuelto el problema de la objetividad, ya que es necesario iluminar la oscuridad que rodea a la palabra *éxito:* hemos indicado solamente que la objetividad, si se enlaza a la experiencia, aparece en escena durante nuestro tránsito de lo inmediatamente dado a lo que, de un modo un tanto impreciso, podemos denominar conceptos o ideas.

Qué sean estos conceptos debe ser materia de ulterior investigación. No son, como se ha pretendido a veces, los aspectos *invariables* de los datos suministrados por los sentidos, pues esta concepción confunde lo invariable con lo racional, y lo racional difícilmente puede ser llamado un aspecto de los sentidos; además, las cosas objetivas cambian de un modo en cierta manera acorde con los datos y no pueden, por consiguiente, sentar ninguna pretensión de invariabilidad temporal. La otra concepción que debe mencionarse como insatisfactoria es la que identifica el objeto con la suma total de todos los datos *posibles* de los sentidos, tal como han hecho MILL, HAMILTON y PEARSON; y ello porque deja confiadamente el asunto en manos de lo desconocido, como lo hace toda referencia a lo posible: además de evasiva, esta concepción es también falsa, ya que el carácter conocido de un objeto determina qué datos sensoriales futuros son posibles tanto como éstos determinan el objeto. Posponemos por el momento el estudio de estos objetos conceptuales y volvemos ahora al estudio de las "reglas" que conducen a ellos.

4.4. LAS REGLAS DE CORRESPONDENCIA

¿Son estas reglas únicas y es ineludible su veredicto? ¿Arrancan siempre esta respuesta las impresiones que normalmente suscitan la idea de árbol? Es probable que una breve reflexión conduzca en este punto a respuestas afirmativas; pero una reflexión más prolongada, sin embargo, puede inducir a negarlas. En realidad, nos proponemos demostrar que tales reglas no son únicas; pues mientras la atención se limite a la cosificación, que constituye el ejemplo más evidente y, por lo tanto,

más difícil de paso desde los datos hasta el conocimiento reflexivo, la concepción kantiana de la correlación *necesaria* (a través de esquemas) es la más natural; pero si consideramos este acto de cosificación como una forma elemental de un procedimiento utilizado bajo circunstancias más complejas en todos los campos de la ciencia, si lo consideramos como el ejemplo más sencillo de una clase universal de relaciones que enlazan, de una forma menos íntima, el olor a gas con una válvula abierta, la elasticidad de la goma con la forma de sus moléculas o el azul del cielo con una determinada longitud de onda de la luz, entonces tal vez desaparezcan las ilusiones de predeterminación e ineludibilidad en estas relaciones. En mi opinión, no puede dudarse de que todas estas relaciones pertenecen al mismo tipo epistemológico, pues me resulta evidente el hecho de que estoy haciendo la misma clase de cosas cuando observo el complejo de datos sensibles que está delante de mí y los juzgo como una mesa que cuando los miro de nuevo y asocio su color con cierta longitud de onda. Si existe alguna diferencia, consistirá en una enteramente trivial: que aquello aprendí a hacerlo de niño y esto siendo ya mayor.

Ahora bien: ha habido, ciertamente, unos tiempos en los que la gente tenía la impresión de "pardo", pero no pasaba (por virtud de una de nuestras llamadas "reglas") al concepto de longitud de onda. Y no es que la vida sea particularmente desagradable para quienes tampoco en nuestro tiempo realizan este paso; en efecto, a veces me pregunto si no echará a perder el físico su goce estético entregándose demasiado fácilmente—por costumbre, si no por deseo—a complicadas asociaciones de este tipo. Pero, sea ello lo que fuere, éstas no son únicas, y, lo que es quizá peor, cambian a medida que cambian las teorías científicas. Si la cosificación es una de tales reglas de correspondencia, que se aplica automáticamente, tiene que deber su apariencia de ser única a la invariabilidad *práctica* con que se realiza.

Naturalmente, *podemos* ver una luz y abstenernos de construir sobre ella un objeto, según hacemos en el indeciso estado de semivigilia que precede al despertar. Es muy posible que en otras culturas, entre los orientales por ejemplo, la transición se realice de otra manera, o que no se realice en absoluto. ¿No podría consistir el nirvana hindú, tenido por inalcanzable para el hombre occidental, en su voluntaria supresión?

Es también notable que no apliquemos semejante regla a gran parte de nuestra experiencia inmediata: ya hemos visto que, por lo que se refiere a la inmediatez y espontaneidad, muchas sensacionas afectivas son imposibles de distinguir de las percepciones; sin embargo, rara vez procedemos a construir esencias objetivas como los análogos de sensaciones objetivas, y nunca lo hacemos únicamente. Desde el punto le vista de la epistemología, el teólogo que busca la "regla" para pasar desde una experiencia inmediata del temor religioso a una presencia divina está haciendo lo mismo que el neurólogo que pone en relación este sentimiento con una determinada situación del sistema nervioso; y am-

bos pretenden lo que hace el físico cuando asocia una longitud de onda con una sensación de color. No puede darse respuesta a las preguntas referentes a cómo funciona la regla y a si un determinado grupo de datos puede ser traducido a conceptos por medio de reglas diversas hasta que investiguemos el papel desempeñado por los conceptos.

Frente a los kantianos aduciríamos, pues, que el carácter específico del tránsito desde los datos brutos hasta el conocimiento organizado, tan claramente columbrado por ellos, no está eternamente asentado en la naturaleza de la experiencia: simplemente, ha evolucionado. El acto de cosificación es, de hecho, el primer paso dado por nuestra especie hacia otros procedimientos más refinados que ahora dominan en las ciencias exactas; y ver en él y en reglas similares las "condiciones trascendentales de la posibilidad de toda experiencia", introduciendo subrepticiamente, juntamente con tales reglas, unos cuantos conceptos apriorísticos so capa de formas de la intuición pura es más arriesgado ahora que en tiempos de KANT, en los que una ampulosa fraseología, liberalmente entremezclada con los místicos e intraducibles *schlechthin* y *überhaupt*, bastaba para asegurar una elevada posición a las teorías del conocimiento La ciencia ha realizado continuas incursiones en el terreno de lo *a priori*, y nos ha mostrado el peligro de formar creencias no cualificables acerca de la experiencia; por eso no sólo miraremos las reglas como resultado de una evolución, sino incluso como alterables.

A todo lo largo de las páginas anteriores un leve estremecimiento ha corrido por la espina dorsal del autor cada vez que empleaba el término *regla* aplicado al paso desde los datos hasta los conceptos, ya que no existe ninguna seguridad de que tal empleo no introduzca un matiz incompatible con el significado deseado. Una regla es generalmente algo que puede ser enunciado, posee un ámbito de aplicación y un contenido; en cambio, las relaciones de que aquí tratamos no siempre pueden ser enunciadas, salvo por referencia a los términos que pongan en relación, y frecuentemente son simples transiciones; en cierto sentido, pues, carecen de contenido por sí mismas. Y es también difícil especificar su ámbito de aplicación: sabemos cuándo se aplica la regla árbol, la regla piedra o la regla puesta de sol, o cuándo se aplica la regla persona, la regla longitud de onda o la regla electrón, pero este conocimiento es muchas veces habitual y solamente aparece con claridad en el momento de su aplicación; difícilmente podría, en efecto, ser de otra manera en vista de la bruma e imprecisión que rodea a lo dado. En muchos aspectos, por lo tanto, la palabra *regla* es una denominación equivocada; la hemos elegido solamente por su falta de color: queríamos evitar la confusión del lector aun a riesgo de desorientarlo momentáneamente.

F. S. C. NORTHROP [5], al tratar de la vinculación entre el "componente empírico de cualquier objeto completo de conocimiento y su componente

---

[5] F. C. S. NORTHROP: *The Meeting of East and West*, Nueva York, The Macmillan Company, 1946, pág. 443; véanse también sus obras anteriores.

teorético", utiliza para estas reglas el adecuado término de "correlaciones epistémicas". Al adoptar ocasionalmente en lo sucesivo esta expresión debemos recordar que las correlaciones no poseen contenido epistémico positivo, esto es, no confieren por sí solas validez al conocimiento: es preciso mirarlas dentro de un contexto metodológico más amplio para que se conviertan en significativamente epistémicas, y su aceptación está determinada por el funcionamiento del aparato conceptual que engendren. En otras obras anteriores el autor [6] las ha llamado "reglas de correspondencia"; y más adelante veremos que la definición operacional de BRIDGMAN [7] es un tipo especial de estas reglas. Según parece, lo mejor que podemos hacer en este momento es ilustrar su uso valiéndonos de nuevos ejemplos [8].

Ejemplos de paso desde los datos hasta el conocimiento metódico

Cuando se estudia la concatenación existente entre lo inmediatamente dado [9] y su contrapartida conceptual aislándola de la totalidad del método científico, tal y como nos disponemos a hacer ahora, no se puede por menos de experimentar una sensación de artificialidad que penetra todo el análisis: ello se debe a que las relaciones que meramente presentamos parecen necesariamente *ad hoc*. Rogamos qor esto al lector que demore su juicio último acerca de la idoneidad de nuestra explicación

---

[6] *Phil. Sci.*, 2:48, 164 (1935).

[7] P. W. BRIDGMAN: *The Logic of Modern Physics*, Nueva York, The Macmillan Company, 1927.

[8] Las reglas de correspondencia podrían ser consideradas como una versión moderna, aunque muy específica, de los "esquemas trascendentales del entendimiento" de KANT. Conceptos análogos en obras más recientes son el "diccionario" de una teoría, de NORMAN CAMPBELL *(The Elements)*, y el "texto" de las ecuaciones, de BRIDGMAN *(The Nature of Physical Theory)*. La distinción actualmente en boga entre la "sintaxis" y la "semántica" de una teoría (véase CHARLES MORRIS: *Signs, Language and Behaviour*, Prentice Hall, Inc. Nueva York, 1946) pone también de manifiesto la necesidad de nuestras propias reglas de correspondencia, las cuales cumplen una finalidad semántica. La semántica es, en realidad, el estudio de las reglas de correspondencia que enlazan ostensivamente las experiencias inmediatas con las palabras de un lenguaje.

Así se ve que la función de estas reglas tiene una extensión muy amplia. En este libro limitamos nuestro estudio de ellas a determinados aspectos que son de importancia en la ciencia, dejando de lado, p. ej., el vasto campo de la lingüística.

[9] Por razones de economía y de sencillez conviene introducir un término más simple en lugar de "lo inmediatamente dado". Ya hemos utilizado "datos" con el que no hemos intentado separar las experiencias inmediatas desde las que siempre se hace una transición hasta el conocimiento metódico, conceptual (las denominadas usualmente datos de los sentidos), de las que por el momento no permiten tales transiciones de un modo aceptable (sensación de culpabilidad, dolor súbito, etc.). Reunimos ahora la primera clase de experiencias y llamamos a esa parte de lo inmediatamente dado "Naturaleza", con N mayúscula. Aunque somos conscientes de que este uso no se halla de acuerdo con el habitual—pues la naturaleza incluye mucho más que la Naturaleza—, vamos a elegir tal artefacto, no obstante, en aras de la brevedad, y dejamos para más adelante todas las cuestiones referentes a las relaciones entre ambos. A lo largo del libro se encontrarán otras leyes semánticas parecidas; así se hará más cómoda nuestra exposición, aun cuando resulte un tanto extraña.

hasta que haya visto un poco más de ella; entretanto, consideremos cinco ejemplos distintos que ilustren los extremos en cuestión.

1. Ya nos hemos ocupado de la aplicación más sencilla de las reglas: es el acto de postular una *cosa* ante una determinada *evidencia sensible,* a lo cual hemos llamado cosificación. Que esta cosa sea un objeto externo no puede ser certificado solamente por las "reglas", sino que requiere que se documente de otra manera, documentación que se refiere a la coherencia de toda nuestra experiencia. Debemos, pues, distinguir entre una regla que cosifique y la parte de la experiencia—que es más amplia—que objetive. La palmera invertida que se ve en el cielo sobre el desierto es una cosa, pero no un objeto externo en nuestros sentidos: solamente se ha aplicado a ella la regla cosificadora de correspondencia. Admitimos que nuestro uso actual de los términos *cosa* y *objeto externo* es arbitrario, pero no lo es la distinción propuesta. En este capítulo no prestaremos atención a los procedimientos validadores que complementan la aplicación de la regla.

2. Otro paso desde la Naturaleza[10] hasta los conceptos, algo menos directo que el precedente, se encuentra siempre que la cosa postulada se halle dotada de cualidades específicas propias, cualidades no "extraídas de los datos". Mencionemos como ejemplo la asignación de una *masa* a los cuerpos, que es el acto que pone en marcha la ciencia de la mecánica. La apócrifa experiencia de NEWTON en el huerto de Woolsthorpe le condujo fácilmente al objeto manzana; sin embargo, asignar una *masa* a la manzana constituyó otro paso; y al darlo, NEWTON pudo formular las leyes del movimiento, la ley de la gravitación universal, etcétera. Debe observarse que la masa es algo muy específico, no visto ni sentido, algo que exige una cuidadosa definición a base de los datos[11]. Lo que nos interesa aquí es la circunstancia de que la adopción de la idea "masa" nos sitúa de nuevo en un terreno racional, en el que son posibles los procedimientos teoréticos (que se vuelven imposibles entre los desnudos elementos de la Naturaleza); y el camino por el que llegamos allí es *diferente* del que nos conducía a cosificar la manzana. La masa, aunque no es parte de la Naturaleza, tiene algunos aspectos intuibles; pero está situada un poco más lejos de la Naturaleza que la manzana.

Las cualidades intuibles de conceptos tales como el de masa, al ser vagas, tienden a hacernos creer erróneamente que son datos. Esta tendencia se ve fuertemente acentuada por la tosquedad del lenguaje, que no nos provee de palabras diferentes para significados distintos. Existe una forma de sentir la masa de un objeto, como hizo el doctor Johnson cuando dio una patada a la piedra para convencer a Berkeley de su realidad; esta llamada "masa" es inmediatamente dada, pero una simple

---

[10] Véase la nota anterior acerca de la diferencia entre el significado de "Naturaleza" y el de "naturaleza".

[11] Véase, p. ej., la estudiadísima definición de MACH, de la que se encontrará un resumen en LINDSEY y MARGENAU: *Foundations of Physics,* págs. 92-94.

ojeada a un texto de física convencerá a cualquiera de la diferencia entre ella y la masa que el físico emplea en las leyes del movimiento. La misma confusión se da en casi todas las cantidades que se encuentran en la ciencia natural: ejemplos de ello son la fuerza, la energía, la luz y el sonido. Con el fin de evitarlo, el físico ha creído necesario utilizar las palabras *subjetivo* y *objetivo,* que hacen ver la diferencia, pero la dejan impregnada de un prejuicio metafísico. Tengamos, pues, cuidado de indagar los múltiples significados de las palabras.

3. Merece ser examinada, siquiera brevemente, la regla de correspondencia entre color y longitud de onda. Del lado de la Naturaleza existe el rojo visual; antes de que surja el concepto de longitud de onda hay que realizar ciertas operaciones, no muy distintas de las investigaciones visuales, táctiles y cinéticas que dan por resultado la idea de "árbol": hemos de tener a mano un espectroscopio con prisma o retícula, es preciso colimar debidamente el foco luminoso, reajustar la ranura y enfocar el anteojo hasta que aparezca una línea en la escala; finalmente, leemos en esa escala la longitud de onda, por ejemplo 6,948 unidades angstrom. La regla en este caso es sumamente instrumental, y conduce hasta un concepto que no se halla muy manifiestamente relacionado con su contrapartida perceptible. Naturalmente, la longitud de onda misma no es perceptible, aunque se vea una línea sobre la escala; pero se la podría llamar pseudosensible, porque es susceptible de representación sensible en forma de longitud de otros tipos de ondas que pueden ser vistos.

4. Existen ejemplos en nuestra experiencia inmediata en que un cuerpo es repelido por otro. Bajo determinadas circunstancias, el físico considera adecuado decir que estos cuerpos poseen una carga eléctrica y, partiendo de ahí, adscribe un campo eléctrico a las proximidades de los cuerpos que se repelen; va luego más lejos y asocia a cada punto del espacio situado en las cercanías de los cuerpos un vector llamado *intensidad del campo,* al que designa con **E**, cuya magnitud numérica es la fuerza que actuaría sobre un determinado cuerpo dotado de carga si estuviera situado en el punto en cuestión. Así pues, la intensidad del campo no es sino una fuerza latente, que puede ponerse de manifiesto mediante procedimientos adecuados. Evidentemente, la regla mediante la cual se construye **E** es de una especie sumamente compleja, que entraña manipulaciones instrumentales y procesos matemáticos; además, **E** no se encuentra en la Naturaleza y es difícil imaginárselo; lo denominaremos abstracto, entendiendo este término como opuesto a concreto, en su sentido vulgar, no literalmente como "extraído de" la experiencia sensoria.

El carácter abstracto de los conceptos explicativos no turba al físico moderno; y en este aspecto su postura difiere notablemente de la de sus predecesores del siglo pasado. FARADAY, por ejemplo, entre cuyas grandes contribuciones a la ciencia figura la formulación de **E**, se sintió incapaz de aceptarlo como algo abstracto, e inventó el éter que llena

el espacio para darle respetabilidad: para él, los campos eléctricos eran fuerzas existentes en un éter omnipresente. Mas hoy sabemos, gracias a la teoría de la relatividad y a muchos experimentos realizados, que la respetabilidad se compra a un precio demasiado alto si se la interpreta como la cualidad de ser imaginable a través de la representación sensoria. Por ello se ha abandonado el éter, y los campos eléctricos se han convertido en cantidades físicas por derecho propio, completamente independientes de la materia. La moda, en lo que se refiere a la respetabilidad, ha recaído en propiedades más formales, que más adelante estudiaremos (capítulo V).

5. Como ejemplo final del funcionamiento de las reglas de correspondencia elegimos uno más difícil aún, que recalca vigorosamente la observación que acabamos de hacer acerca de la abstracción. Hay ciertas situaciones en las que el físico asevera la presencia de electrones. Vamos a suponer ahora, en gracia a la sencillez, una situación un tanto idealizada, aunque no imposible, en la que pueda conseguir la emisión de electrones aislados por un cañón de electrones; y ahora querrá averiguar la posición de un electrón transcurrido cierto tiempo después de haber sido emitido.

Ahora bien, hemos visto ya en la Sección 3.4. que esta posición no puede ser determinada: es preciso, pues, admitir que la palabra *posición* es un tanto vaga. También en otros aspectos nos hemos visto obligados —y seguiremos estándolo— a emplear ambiguamente palabras comunes; por ejemplo, toda la descripción contenida en el apartado anterior era indiscriminada, ya que se refería unas veces a la Naturaleza y otras, más frecuentes, a conceptos ya separados de la Naturaleza por la aplicación de nuestra regla en diversas formas: así, hemos hablado de **E** como relacionado con la Naturaleza, y resumíamos esta relación en un enlace entre **E** y la fuerza actual sobre ciertos cuerpos; de hecho, sin embargo, ni la fuerza ni los cuerpos son partes de ninguna sensación inmediata, no obstante lo cual hemos empleado esos términos como si lo fuesen, esperando tácitamente que el lector proporcionara las ulteriores y sencillas reglas de correspondencia que los convierten en tales. Este carácter incompleto de las proposiciones se manifestará claramente a lo largo del texto (difícilmente cabe evitarlo, salvo adoptando un lenguaje sumamente formalizado y artificial). Sentado esto, volvemos a nuestro ejemplo del paradero de un electrón.

Para satisfacer su deseo, el físico instala un contador de electrones, que da un chasquido siempre que un electrón penetre en él. Supongamos que el orificio de entrada es muy pequeño y que el cañón está apuntado exactamente contra él; resultará entonces que un electrón emitido penetrará a veces y a veces fallará. A una persona versada en física moderna le parecerá muy razonable tal cosa, pues es evidente que diversas influencias conspiran para apartar al electrón de la trayectoria rectilínea; pero numerosos hechos, firmemente enclavados en la teoría de los *cuantos,* nos obligan a rechazar esta explicación de las manifiestas des-

viaciones del electrón y nos obligan a decir que *no tiene posición exacta* [12]. Entonces, el físico repite muchas veces el experimento, haciendo que los electrones sean emitidos desde un cañón fijo, pero con el contador en lugares ligeramente diferentes, y determina así la probabilidad (o frecuencia relativa, si el lector lo prefiere) de encontrar un electrón cuyo estado se prepare de una manera definida en puntos diversos del espacio. La función φ, definida de tal modo que los cuadrados de sus valores absolutos sean idénticos a las probabilidades observadas, es entonces la *función de estado* del electrón así preparado.

La función φ es una propiedad del electrón del mismo modo que el color azul es una propiedad del firmamento: es una cantidad física en el mismo sentido que una longitud de onda o un campo eléctrico, y corresponde a ciertos aspectos de la Naturaleza. Pero la correspondencia, aunque perfectamente inequívoca y carente de ambigüedad, es sumamente instrumental, selectiva y refinada: la regla nos lleva en este caso por un largo sendero desde los datos hasta el campo de lo abstracto, si bien, con todo, desempeña el mismo papel metodológico que las reglas encontradas en los cuatro ejemplos anteriores. Todas ellas llevan al conocimiento desde los desnudos hechos sensoriales hasta un terreno en donde son posibles los procesos lógicos; pues a base de funciones φ podemos razonar, y predecir allá donde por mucho que atendiésemos a chasquidos de contadores no hubiera sido esto posible.

Obsérvese también cómo hace su aparición otra insólita característica. Una función φ no queda relacionada mediante una regla de correspondencia con un único acontecimiento producido en la Naturaleza, sino con muchos: *todas* las respuestas del contador quedan sintetizadas merced a la regla en *una* función de estado, y esta síntesis implica la idea de probabilidad. Tal vez parezca esto extraño e incluso discutible desde el punto de vista de la física clásica; mas si así es solamente hay un remedio: debe ampliarse la metodología de la ciencia clásica hasta que incluya tales características.

4.5. Las construcciones interpretativas

Hemos seleccionado los ejemplos de la sección precedente teniendo presente una finalidad concreta: hacer patente, por el orden elegido, un progresivo ensanchamiento del hiato que se abre merced a las reglas de correspondencia. Pues en la cosificación no damos sino un pequeño paso hacia los conceptos; avanzamos una distancia mayor al atribuir

---

[12] En el libro de Dirac: *Quantum Mechanics*, Nueva York, Oxford, 1930, se encuentran la gran mayoría de los argumentos que hacen inevitable esta conclusión. Véase también J. von Neumann: *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, Berlín, Springer-Verlag, 1932. La presente exposición es anticipación y breve resumen del material desarrollado más convincentemente en los capítulos XVI a XVIII.

masas, hasta que, finalmente, al definir una función de estado, emprendemos un vuelo de considerables dimensiones, adentrándonos en lo abstracto. En cada uno de estos ejemplos hemos hablado de *una* regla, pero ello no debe predisponernos en contra de la posibilidad de admitir que cualquier regla pueda resolverse en un número arbitrario le reglas más sencillas. (En los formalismos teoréticos, incluyendo la lógica, es peligroso contar entidades, pues raras veces existe forma de determinar qué entidades son básicas: las ideas, los conceptos y relaciones no satisfacen los axiomas de la aritmética.)

Si se realiza tal reducción se descubre que entre las nuevas relaciones hay algunas que no tienen un final en la Naturaleza, sino que unen dos o más conceptos diferentes. Por ejemplo, la relación chasquidos de contador → función φ podría desmembrarse en dos: 1) chasquidos de contador → electrón; 2) electrón → función φ. De ellas, la primera tiene un pie en la Naturaleza, la segunda ninguno. Que consideremos a la segunda una regla de correspondencia o no es cuestión solamente de nomenclatura; preferimos no hacerlo así por el momento, y mirarla como una relación entre dos entidades ya determinadas por reglas; pero quede claro que cualquier regla dada de correspondencia (o correlación epistémica) puede ser arbitrariamente ampliada del lado conceptual añadiendo relaciones del tipo 2.

Una regla de correspondencia enlaza lo que hemos denominado Naturaleza con entidades que hemos llamado vagamente conceptos, ideas, elementos reflexivos, etcétera. Para éstas deberíamos introducir también un nombre especial. Un árbol determinado o un electrón determinado difícilmente son conceptos, debido a las implicaciones genéricas de esta palabra; y, sin embargo, nuestras reglas conducen a árboles y electrones determinados. Tampoco es posible denominar ideas a estas entidades, a menos que se quieran abrir las compuertas del equívoco; mas, por otra parte, participan del carácter de conceptos e ideas por ser racionales, por someterse a procedimientos lógicos en mucha mayor medida que los datos de la Naturaleza.

Para indicar que no son simples rebañaduras del campo de la percepción sensorial, sino que adquieren existencia más bien a través de lo que sentimos que son procesos creadores de nuestra propia experiencia que a través de una contemplación pasiva, para poner de relieve su flexibilidad racional y, sin embargo, distinguirlas de conceptos oscuros, el autor los ha denominado en otras ocasiones *construcciones interpretativas* [*constructs*]*. Aunque se ha criticado con justicia este uso, tachándolo

* Empleamos la expresión "construcciones interpretativas", dado que *construct* puede entenderse como relacionada con el verbo *to construct* (construir) y con *to construe* (entender algo de tal o cual modo, interpretar); relación esta última que se tiene bien presente en muchos autores de metodología científica, aunque MARGENEAU no la haga salir a primer plano. "Construcción", a secas, sería insuficiente, y lo mismo sucedería con el neologismo "constructo", cuya dureza sólo conseguiría evitar las posibles ambigüedades de "construcción" (que también se salvan con "c. interpretativa").

de vago, y en ocasiones se lo ha entendido mal, no se me alcanza todavía qué nombre pudiera ser más apropiado: las palabras conocidas han quedado sometidas a un derecho de preferencia, y yo incurriría en las iras de mis colegas científicos si malgastara una palabra griega en algo menos importante que un aparato para desintegrar átomos. Por ello, con mis excusas al lector, continuaré usando esa expresión.

Una construcción interpretativa no es algo que se encuentre ya hecho, sino que posee muchas de las cualidades de una invención. Aquí es posible que aun el lector de ánimo mejor dispuesto menee la cabeza, pues es evidente que árbol, masa y electrón son más que invenciones y, por consiguiente, más que construcciones interpretativas. Pero no negamos que sean algo más que meras construcciones: son construcciones *útiles,* o, para ser mucho más precisos, *válidas,* válidas en un sentido que hemos de concretar más adelante. Los fantasmas, los espejismos y el éter luminífero son también construcciones interpretativas; y la tarea principal de una metodología de la ciencia (y, en realidad, de toda epistemología) es investigar qué exigencias debe satisfacer una construcción interpretativa para ser admitida como válida, o, como diremos más adelante, para convertirse en un *verifacto* (a lo cual dedicaremos los dos capítulos siguientes). Entiéndase pues, que nuestra designación, o sea, la de construcción interpretativa, va destinada simplemente a asignar a los árboles, los electrones, los fantasmas y los diablos, su categoría genética correcta en la experiencia; la característica de ser una construcción interpretativa no proporciona por sí sola una entidad intelectual dotada de importancia científica.

Aun a riesgo de repetirnos es necesario que nos ocupemos una vez más del punto ya expuesto acerca de la diferencia entre conceptos y construcciones interpretativas. Evidentemente, el árbol *es* la construcción interpretativa: de esa manera se resume la experiencia unitaria del árbol; y éste es permanente exactamente hasta el punto en que la permanencia haya sido elevada a la categoría de elemento racional en tal construcción. No existe un árbol y una construcción interpretativa suya, ni una longitud de onda *y* mi construcción interpretativa de ella.

Sin embargo, en gran parte del discurso la expresión *construcción interpretativa,* tal y como la hemos empleado aquí, es completamente sinónima a la de concepto. Así, por poner otro ejemplo, la construcción interpretativa electrón, cuando se la utiliza sin ninguna referencia cualificadora al tiempo y al espacio, es también lo que comúnmente se denomina el concepto de electrón. Ahora bien, cuando hablamos del concepto de un electrón determinado, el que acaba de incidir sobre una pantalla fluorescente, tendemos a implicar una distinción entre ese concepto y el objeto real existente en la pantalla; pero la actitud que hemos tratado de esbozar suprime esa distinción: el electrón, como objeto externo, es la construcción interpretativa. De todas las palabras inmediatamente disponibles, concepto es la más próxima a lo que queremos designar: pero el deseo de evitar el compromiso con el realismo,

por una parte, y con el idealismo, por otra, y de soslayar el replanteamiento de los problemas a que daría lugar tal compromiso, ha determinado la decisión del autor de continuar usando ese otro término menos habitual.

Entre los autores más modernos fue KARL PEARSON [13] quien dio carta de naturaleza a la palabra construcción interpretativa [*construct*]. Sin embargo, la empleó en un sentido completamente distinto y atribuyó su utilización al biólogo MORGAN; así en la página 41 de *The Grammar of Science* leemos:

> Debido a la importancia de lo que nosotros mismos aportamos a la mayoría de los objetos exteriores, el profesor LLOYD MORGAN, en el excelente estudio de esta cuestión que realiza en su obra *Animal Life and Intelligence* (pág. 312), propone utilizar la expresión de construcción interpretativa para designar el objeto exterior. A los efectos que ahora nos ocupan es necesario tener en cuenta que un objeto exterior es en general una construcción interpretativa, esto es, una combinación de impresiones sensoriales inmediatas con otras pasadas o almacenadas. La realidad de una cosa depende de la posibilidad de que se presente, en todo o en parte, como un grupo de impresiones sensoriales inmediatas.

El espíritu del precedente análisis excluye la aceptación del significado del término con el excesivo aliño positivista con que PEARSON lo adoba [14]: los árboles, las moléculas, los electrones y los genes no se componen exclusivamente de impresiones sensoriales pasadas y presentes, sino que contienen también elementos racionales que apuntan más allá de todos los aspectos de inmediatez que intervienen en su estructura.

Nosotros sostenemos que la *abstracción* es una forma elemental de efectuar una construcción interpretativa, y sólo una forma elemental: la abstracción es la fusión de particulares en universales, y se presenta en todos los niveles de la ciencia. La formación de construcciones interpretativas, además de realizar esta fusión, dota al producto resultante de unas propiedades idóneas que le serán propias: es un acto creador a la par que sintético.

La diferencia se verá claramente si se consideran las ideas de tiempo y espacio. El espacio *abstraído* de la experiencia posee muy poca uniformidad: es una especie de espacio privado, no homogéneo, no isotrópico, con una abrumadora diversidad de características íntimas; difícilmente, en efecto, puede considerarse apropiado hablar de *un* espacio abstraído, sino que debería hablarse de muchos espacios, visual, táctil, auditivo, etcétera. El espacio *construido interpretativamente,* sin embargo (como

---

[13] Karl PEARSON: *The Grammar of Science,* 3.ª edición, I Parte.

[14] PEARSON sigue diciendo *(ibíd.,* pág. 66): "La mente se halla totalmente limitada por su contenido a una única fuente, la impresión sensible: puede clasificar, analizar, asociar y elaborar, pero siempre con ese mismo material..."

el euclidiano o el riemanniano), se remonta por encima de estos otros en virtud de una uniformidad postulada que, de una forma que será objeto de estudio más adelante, acoge y, a la vez, desafía en gran medida las embestidas de la experiencia inmediata. La expresión *construcción interpretativa* tiene una aceptación similar a la utilizada por RUSSELL [15]: para él, significa la sustitución de complejos de sensaciones por relaciones *matemáticas,* sustitución en virtud de las semejanzas formales existentes entre ellos. En el capítulo siguiente veremos, no obstante, que él acentúa más el parecido matemático, y que su concepción de la sustitución es más fenomenista de lo que propugnamos en la presente obra.

RESUMEN

La experiencia, al tornarse completa e integrada, avanza desde lo sensorial y espontáneo hasta lo racional y reflexivo; y en virtud de este paso, los elementos de lo dado adquieren características metódicas y ordenadas que permiten a la razón apoderarse de ellos. Entre las peculiaridades de los meros datos de los sentidos figuran cierta imprecisión lógica y una enmarañada serie de relaciones que desafían la clasificación de los simples datos como individualidades. Por este motivo, no es posible definir las experiencias formadas con los datos sino de un modo denotativo o extensivo.

El paso al conocimiento metódico implica que se propongan construcciones interpretativas, que son los elementos racionales con los que se hace corresponder la experiencia de los datos. Un objeto exterior es la construcción interpretativa más sencilla que habitualmente erigimos frente a la mayoría de los distintos tipos de percepción sensorial; otras son las formas geométricas, los números y la mayoría de las refinadas entidades de la física moderna. El hecho de que inventemos una construcción interpretativa no entraña la seguridad de que sea científicamente aceptable, ni de que forme parte de la realidad; en otros capítulos posteriores examinaremos las condiciones bajo las cuales puedan afirmarse estas cualidades.

La experiencia avanza desde los datos hasta las construcciones interpretativas a través de las relaciones directrices que suelen denominarse "reglas de correspondencia". Estudiamos éstas apoyándonos en varios ejemplos, y llegamos así a los siguientes hechos: la regla más sencilla de correspondencia es la relación cosificadora, la transición desde los aspectos visuales no analizados "árbol" hasta el objeto externo árbol; otras son menos directas, como, por ejemplo, la regla que lleva al físico a postular una longitud de onda cuando se ve una determinada luz azul. Sostenemos que las reglas de correspondencia no se hallan

[15] B. RUSSELL: *Our Knowledge of the External World as a Field for Scientific Method in Philosophy,* La Salle de Ill., The Open Court Publishing Company, 1914, y Londres, George Allen & Unwin, Ltd., 1926.

eternamente ínsitas en la naturaleza de las cosas ni están sugeridas inmediatamente por la experiencia sensible, sino que constituyen una importante parte de toda teoría de la naturaleza y adquieren validez merced a la consistencia, la pulcritud interna y el éxito de todo el sistema explicativo.

BIBLIOGRAFIA

BLANSHARD, B.: *The Nature of Thought,* Nueva York, The Macmillan Company, 1940.

LEWIS, C. L.: *Mind and the World Order,* Nueva York, Charles Scribner's Sons, 1929.

MACINTOSH, W. C.: *The Problem of Knowledge,* Nueva York, The Macmillan Company, 1915.

MURPHY, A. E.: *The Uses of Reason,* Nueva York, The Macmillan Company, 1943.

NATORP, P.: *Die logischen Grundlagen der exakten Naturwissenschaften,* 3.ª edición, Berlín, B. G. Teubner, 1910.

NORTHROP, F. S. C.: *The Meeting of East and West,* Nueva York, The Macmillan Company, 1946 [vers. cast.: *El encuentro de Oriente y Occidente,* México, EDIAPSA, 1948].

NORTHROP, F. S. C.: *The Logic of the Sciences and the Humanities,* Nueva York, The Macmillan Company, 1947. (Véase también el capítulo NORTHROP en *Ideological Differences and World Order,* New Haven de Conn., Yale University Press, 1949.

ROBERTSON, H. P.: "Geometry as a Branch of Physics", Library of Living Philosophers, tomo sobre EINSTEIN (editado por P. Schilpp), Evanston de Ill., 1949. Este ensayo es una excelente descripción de la influencia recíproca entre las construcciones interpretativas y las reglas de correspondencia.

SCHLICK, M.: *Allgemeine Erkenntnislehre,* Berlín, Springer-Verlag, 1918.

SOROKIN, P. A.: "Lasting and Dying Factors in the World's Cultures", *Ideological Differences and World Order* (editada por F. S. C. Northrop), New Haven de Conn., Yale University Press, 1949.

Von WEIZSÄCKER, C. F.: *Zum Weltbild der Physik,* Leipzig, S. Hirze, 1945.

WALSH, W. H.: *Reason and Experience,* Nueva York, Oxford University Press, 1947.

WHITEHEAD, A. N.: *Principles of Natural Knowledge,* Londres, Cambridge University Press, 1925. Véase especialmente el capítulo 8, sobre el método de abstracción extensiva.

WILD, J.: "The Concept of the Given", *Phil. and Phenom. Research,* septiembre de 1940, pág. 70.

CAPITULO V

LOS REQUISITOS METAFISICOS DE LAS CONSTRUCCIONES INTERPRETATIVAS

5.1. Las construcciones interpretativas no están totalmente determinadas por la percepción

La experiencia fluye desde el estrecho campo de lo inmediatamente sentido, y a lo largo de los canales señalados por las "reglas de correspondencia", hasta llegar al terreno, más despejado, de los conceptos, en el que se hacen posibles las operaciones lógicas. Si las reglas de correspondencia estuviesen instauradas exclusivamente por la experiencia sensorial y si su correcto descernimiento, conseguido atendiendo a los datos sin apelación alguna a principios metasensibles, satisficiese nuestra ansia de conocimiento, estaría mal elegida la expresión de *construcción interpretativa* como designación de los elementos que hacen juego con los datos. Pero si las reglas no son en sí algo único y si, además, no determinan si lo que definen es físicamente aceptable o no, el regusto conativo de tal denominación recomienda su uso como apropiado. En ese caso deben de actuar en el proceso cognoscitivo otros principios de validación aún no examinados: los datos, entonces, meramente *sugerirán* lo que ha de corresponder a los sentidos, que se verá sometido a examen o construido provisionalmente bajo la directriz de unas reglas de correspondencia *asumidas*. Vamos a intentar demostrar que esto es lo que efectivamente ocurre.

La historia de la ciencia está llena de ejemplos que corroboran nuestro punto de vista. Seleccionando uno particularmente evidente, recordemos que la experiencia sensorial "agua" se puso en correlación con una figura geométrica (el icosaedro) por Pitágoras y con átomos lisos por Demócrito, y que en la actualidad se la hace corresponder a la fórmula H_2O y a todo lo que ella implica; lo cual sería una paradoja si la Naturaleza nos proporcionase unas reglas de correspondencia predeterminadas y válidas. De modo semejante, no es posible seguir el desarrollo de la óptica, los cambios experimentados por nuestras concepciones del calor, el sonido, la electricidad, la afinidad química, la combustión o el firmamento, ni por nuestras nociones del alma humana, sin sentirse impresionado por la multitud de formas a través de las cuales ha tratado el hombre de enlazar la Naturaleza con la razón. Y tampoco puede sostenerse, a la vista de estas pruebas, que el método actualmente en boga tenga probabilidad alguna de ser definitivo.

Quienes insisten en que nuestra elección de reglas no es sino aparente, pues proviene de las limitaciones existentes en nuestro conocimiento de la Naturaleza, y que no habría ninguna incertidumbre ni elección si tuviéramos a nuestra disposición todas las experiencias sensoriales posibles, oscurecen enormemente la situación. Si todo ello fuese cierto, sería preciso considerar que el proceso histórico discurre a lo largo de una línea de autocorrección en sentido convergente hacia las reglas de correspondencia definitivas, y, además, preciso sería considerar que esta convergencia estaba impuesta exclusivamente por los datos. Ahora bien: los elementos de juicio científicos no pueden demostrar por sí solos que exista semejante convergencia ni que el proceso histórico discurra a lo largo de una línea de autocorrección en vez de seguir una trayectoria periódica, cíclica, o puramente aleatoria. Pero el factor correctivo, si realmente existe, *no* lo aporta enteramente, ni siquiera predominantemente, la observación externa: la consistencia interna, la simplicidad de concepción y la elegancia de formulación participan por lo menos en igual medida en el regimiento del progreso científico; los datos solos no proporcionan condiciones suficientemente estrictas como para determinar unívocamente nuestra comprensión de los acontecimientos.

Este hecho ha sido reconocido —y a veces exagerado— por varios pensadores modernos. Así, POINCARÉ atribuyó tanta importancia a los principios formales, que consideraba sujetos a una manipulación en gran parte a nuestro arbitrio, que denominó *convencional* la selección de construcciones interpretativas en muchos campos de la ciencia; y MACH y sus seguidores percibieron claramente el fracaso de tales construcciones en su pretensión de estar dadas exclusivamente por la Naturaleza, y las consideraron, por consiguiente, como conceptos ficticios, inventados por razones de economía de pensamiento. Tales actitudes reflejan un significativo aspecto de todos los elementos constituyentes de la teoría física, pero caen en un error porque, al admitir la insuficiencia de las observaciones para definir la teoría, detienen toda indagación y no buscan nada más. En el presente capítulo vamos a investigar ciertos principios ideales que complementan las reglas de correspondencia en su función de producir una teoría aceptable; mas, para mostrar con mayor claridad la necesidad de tales principios, hagamos ver más pormenorizadamente que estas reglas no bastan para engendrar construcciones interpretativas.

El tipo más simple y, ciertamente, el más seguro de correlación epistémica es el que enlaza los datos de los sentidos con la actuación de una Providencia divina. La experiencia no puede impugnarlo jamás, y si la Naturaleza determinase por sí sola la teoría, ésta sería la mejor interpretación posible del universo sensible. Sin embargo, los científicos la rechazan; pero no porque yerre, sino porque no llega a satisfacerles, y no les satisface porque es demasiado roma y prosaica: carece—por extraña que resulte la afirmación— del grado de refinamiento metafísico que es menester, pues el mismo hecho de que jamás pueda demostrarse que incurra en error está en contra suya, le hace violar lo que podría deno-

minarse el espíritu de la ciencia, las reglas del juego. No tardaremos en tener que responder a la pregunta: ¿por qué es acientífica tal teoría pese a la circunstancia de que sus reglas de correspondencia sean sencillas—más sencillas quizá que las que nos hacen cosificar un objeto—y pese al hecho de que no puedan extraviarse?

Una situación parecida, aunque menos trivial, surgió en la física a principios del siglo XX. Se había formado entre los investigadores la costumbre de poner en correlación los datos con modelos mecánicos; de este modo se pisaba el más firme de los suelos, ya que POINCARÉ había demostrado—o se creía que lo había hecho—que *todo* fenómeno podía ser reducido a algún tipo de modelo; y en este punto no se plantearon dudas graves hasta que aparecieron HEISENBERG y DIRAC, pese a que en la electrodinámica y la óptica los modelos habían quedado abandonados mucho antes de que se hiciesen los decisivos descubrimientos de la mecánica de los *cuantos*. Evidentemente, este abandono no estuvo exigido por nuevos hechos *experimentales:* se produjo por razones más sutiles. Y obsérvese que la actitud de los últimos mecanicistas, su insistencia en los modelos y su preferencia por los esquemas susceptibles de ser intuidos, estaba enraizada, a su vez, en una trama de convicciones acerca del mundo, no venía dictada por la Naturaleza.

Nuestro conocimiento de la fuerza de gravedad ha recorrido cierto número de interesantes fases. Con ARISTÓTELES no existía fuerza de ninguna clase: los cuerpos que caían seguían un movimiento natural y no necesitaban fuerza alguna. Esta postura, juntamente con la extraña definición de fuerza que implica, es totalmente inatacable en un terreno empírico, pero insatisfactoria desde otros puntos de vista, y dejó paso a la concepción de la gravitación universal, de NEWTON, una de las más grandiosas teorías científicas jamás conocidas. La relatividad general tiende en la actualidad a reemplazarla, y no deja de ser instructivo ver por qué pretende esta teoría ser superior. En el terreno de lo inmediatamente dado solamente es posible encontrar dos efectos sumamente pequeños que estén en desacuerdo con la ley de NEWTON: el avance del perihelio del planeta Mercurio y la desviación de los rayos de luz al pasar cerca del sol. Podría soslayarse fácilmente el inconveniente recurriendo a una ligera corrección de la ley de NEWTON, una corrección que dejase intacta sus construcciones interpretativas esenciales y sus reglas de correspondencia; pero EINSTEIN quiere desechar toda su estructura conceptual, suprimir masas y fuerzas, suponer que todos los cuerpos se mueven en línea recta y achacar al espacio las aparentes desviaciones de tal supuesto. Sus argumentos son, efectivamente, poderosos; su hipótesis, sin embargo, no descansa en los pequeños efectos anteriormente mencionados, sino que adquiere significación y fuerza persuasiva en virtud de que apela a principios unificadores de la comprensión.

Echemos, finalmente, un rápido vistazo a uno de los problemas de la hora presente. Los elementos constitutivos de los núcleos atómicos se mantienen unidos merced a la acción de fuerzas que, según se sabe,

son mucho más intensas que las conocidas fuerzas de la atracción eléctrica o gravitatoria; y también manifiestan un tipo inesperado de variación en función de la distancia entre las partículas sujetas a atracción. ¿Por qué habría de considerar el físico estos hechos, que podía perfectamente acoplar dentro de los antiguos esquemas admitiendo el descubrimiento de un nuevo y extraño conjunto de fuerzas, como un desafío a su inteligencia? La única respuesta es que ha sentido que no podía haber nada tan prosaico y vulgar como un nuevo conjunto de fuerzas que se presentasen en escena sin previo aviso y procedentes de no se sabe dónde; se ha reafirmado su fe en el ajuste interno y la simplicidad de todos los esquemas explicativos, que ahora le ha recompensado con un mayor conocimiento acerca de los mesones, nada menos; porque ha resultado que el mesón, la partícula nuclear recién descubierta, es el origen de esas extrañas fuerzas.

¿Cuáles son, pues, los *principios* que, además de las reglas de correspondencia, nos guían en la tarea de formar construcciones interpretativas, y de dónde proceden?

5.2. Ciencia y metafísica

Hemos tratado de poner de manifiesto que los principios directivos no llegan hasta nosotros procedentes del mundo de los sentidos. Es perfectamente adecuado decir que la razón los impone a la experiencia, siempre que por "imponer" se entienda un modo de hacer que se acoplen más que de constreñir: la conformidad entre la teoría y el experimento no es la existente entre un molde y su vaciado, sino la que se da entre un líquido y un objeto sumergido en él. La metáfora se hace aún más oportuna, apropiada, si consideramos al objeto dotado de elasticidad y cediendo ligeramente a la presión del flúido circundante, y que este último elimine o disuelva las pequeñas irregularidades existentes en la superficie del objeto.

Para prescindir de vaguedades y mostrar en su funcionamiento tales principios racionales, elijamos el ejemplo de las fuerzas nucleares para someterlo a un breve examen[1]. Primeramente teníamos pruebas empíricas de la existencia de nuevas fuerzas entre las partículas elementales componentes de la materia, estado de cosas creado por nuevas observaciones (el descubrimiento de Chadwick del neutrón, el reconocimiento de los protones y neutrones como sillares del edificio de los núcleos, las energías de ligadura de los núcleos y la dispersión de neutrones y protones por protones) al que acoplábamos las viejas reglas de correspondencia. Las características desconcertantes de esta situación eran la

[1] Puede verse una sencilla exposición de este tema en B. Hoffman: *The Strange Story of the Quantum*, Nueva York, Harper & Brothers, 1947 [vers. cast.: *La peregrina historia del átomo*, Madrid, Aguilar, 1953]. En un trabajo de H. Margenau y R. B. Setlow (*Am. J. Phys.*, 13:73 [1945]) se encuentra una exposición algo más técnica.

enorme intensidad de las fuerzas existentes entre los nucleones[2] (unas 10^{36} veces la intensidad de la fuerza de gravitación) y la cortísima distancia a que actúan (esta distancia, llamada campo, es solamente 1/10.000 del diámetro de un átomo); mas ¿por qué habrían de ser desconcertantes estas características?

A los ojos del profano la importancia de un descubrimiento se mide frecuentemente por su extrañeza, por la cantidad de sorpresa pública que ocasiona. Para el científico, sin embargo, esto es un claro error, pues recela de las grandes desviaciones de lo esperado y sospecha la presencia de un yerro o una imperfección cuando se encuentra con un descubrimiento extraño: se desconcierta más fácilmente que el científico periodístico y tiene mayor fe en el carácter razonable de la experiencia. En el caso de las fuerzas nucleares infirió, simplemente, que la desviación de lo razonablemente esperado era demasiado grande, que representaba una violación de lo que ha sido a veces denominado "la coherencia de la naturaleza" (esto es, de la experiencia), optando por creer que solamente conocían una parte de la cuestión.

El físico japonés YUKAWA formuló entonces una brillante sugerencia: si hubiese unas partículas de masa intermedia entre la del electrón y la del protón presentes en la proximidad de dos protones o neutrones interactuantes, la atracción entre ellos podría explicarse del mismo modo que la existente entre dos partículas corrientes, cargadas. La sugerencia era brillante porque disminuía el carácter extraño del descubrimiento original, porque devolvía coherencia a la experiencia: y el hecho verdaderamente notable es su éxito: las partículas que se habían conjeturado se hallaron al efectuar ciertas investigaciones sobre los rayos cósmicos.

La creencia en algo así como la "coherencia de la naturaleza" constituye un importante factor en la investigación científica. Una exposición de la filosofía de la ciencia —o, verdaderamente, del significado de la realidad— no puede permitirse el lujo de pasarlo por alto a título de simple factor metodológico. Cuando se lo enuncia dándole el nombre de coherencia de la naturaleza, se trata de un principio, ciertamente, de gran vaguedad, y nos proponemos formularlo de un modo mucho más preciso; mas, no obstante su oscuridad actual, se ve inmediatamente que no es consecuencia de ningún conjunto determinado de datos y que, en tanto en cuanto regula nuestra interpretación de lo inmediatamente dado, no es posible determinar completamente su carácter ni siquiera por la finita totalidad de todos los datos. Desde luego, la experiencia sensorial lo apoya, y psicológicamente se encuentra ínsito en todos los procedimientos racionales. En un sentido lógico, la creencia en la coherencia y otras creencias análogas a ella son independientes de los datos sensoriales, aunque carece de sentido decir que sean anteriores a la percepción; más adelante estudiaremos si representan o no juicios sinté-

[2] El nombre de *nucleón* está haciéndose de uso general aplicado a cualquier partícula de las que componen los núcleos atómicos. Los nucleones que actualmente conocemos son el protón, el neutrón y, al menos dos tipos de mesones.

ticos, ya que se trata de una cuestión de cierta importancia, que puede también dar lugar a muchas interpretaciones erróneas. Evidentemente, estos "principios" contienen un elemento exhortativo que posee algunos aspectos del analítico: tienen algo en común con las categorías de KANT; considerarlos, sin embargo, como condiciones *a priori* de toda experiencia es compendiarlos hasta la extinción; pues si bien son independientes de la experiencia espontánea, son, empero, parte de la experiencia, considerada como un todo, y ella los estabiliza. Creemos, no obstante, que *puede* haber experiencia sin ellos.

La metafísica es una palabra odiosa en algunos sectores científicos. Su significado ha fluctuado grandemente a lo largo de la historia de la filosofía, pero a partir de KANT ha tendido a designar dos grandes ramas del pensamiento: la ontología y la epistemología. Nosotros sostenemos con KANT que la epistemología debe preceder a la ontología y que epistemología significa metodología del proceso cognoscitivo. La metodología de la ciencia involucra transmisiones de los sentidos, así como reglas de correspondencia, construcciones interpretativas y principios reguladores de ellas; sabedores ya de que estos últimos no proceden de los datos sensibles y de que poseen, sin embargo, una función directriz y orientadora en relación con la experiencia, deberíamos llamarlos principalmente metafísicos en el sentido moderno de la palabra. Los principios metafísicos así entendidos constituyen una importante parte de todos los procedimientos que definen en último término la realidad.

Estos principios no se hallan invariablemente predeterminados por nuestros órganos de conocimiento: su inmutabilidad es un mito claramente manifestado en el sentido de la historia de toda ciencia; así, el postulado de SANTO TOMÁS DE AQUINO de la compatibilidad entre la revelación y el método científico, o la insistencia de DESCARTES sobre la identidad entre lo formalmente demostrado y lo materialmente percibido, son principios metafísicos que han sido ya abandonados por la ciencia moderna; y otro tanto puede decirse acerca de las condiciones apriorísticas del conocimiento, según KANT, y acerca de la creencia de MAXWELL en la ultimidad de los modelos mecánicos como símbolos explicativos Cierto es, sin embargo, que los principios metafísicos evolucionan a un ritmo relativamente lento y que un ligero cambio en ellos ocasiona profundas modificaciones en el detalle de la estructura de la ciencia.

¿Cuál es, entonces, su origen? Nosotros sostenemos que surgieron primeramente del arroyo de la experiencia a manera de recursos vacilantes, fueron transformándose en creencias implícitas con aplicaciones cada vez más numerosas y, finalmente, se fortalecieron bajo el influjo de su repetido éxito hasta penetrar toda la trama de nuestras teorías acerca del mundo. Su ubicuidad hace que sea difícil discernirlos, y, de hecho, lleva a muchos positivistas a negar de plano su presencia.

Una vez admitida ésta y el papel que desempeñan, tratemos de adquirir un conocimiento más claro de su naturaleza específica en cuanto reguladora de las teorías que encontramos en la ciencia de hoy.

5.3. El requisito de fertilidad lógica (A)

La presente obra no pretende ofrecer un análisis completo de los principios metafísicos utilizados en las ciencias deductivas; se propone, simplemente, enumerarlos y mostrarlos en funcionamiento. No estamos seguros de que nuestra enumeración sea exhaustiva, mas podemos decir sin lugar a dudas que los distintos puntos—esto es, los requisitos de las construcciones interpretativas—que son objeto de epígrafes y estudio separados en las secciones A a E, no poseen un carácter estanco, celular: como veremos más adelante, se entrecruzan y superponen unos con otros. Como suele frecuentemente ocurrir con las cuestiones ideales, rehúsan dividirse nítidamente en partes discontinuas, y no existe razón alguna por la que deban hacerlo; como ya hemos indicado, las ideas no obedecen a las leyes de la aritmética. Así, por ejemplo, si bien la presente sección se consagra al requisito de la fertilidad lógica y la siguiente al de las vinculaciones múltiples, la distinción entre ambos que trazamos de este modo es algo arbitraria: la separación entre uno y otro tema es ventajosa simplemente porque el primer requisito se refiere solamente a las construcciones interpretativas, mientras que el segundo se refiere a ellas y a las reglas de correspondencia.

La exigencia de que las construcciones interpretativas posean *fertilidad lógica* (o manejabilidad) es tan sencilla que roza casi lo trivial: reclama que se formulen de modo que permitan la manipulación lógica; por lo demás, pueden ser sujetos o predicados, individuos o universales; y entran como términos en proposiciones que pueden incluirse, contradecirse o implicarse entre sí. Todo esto, que aquí enunciamos en forma tosca, pero que constituye el tema de muchos tratados de lógica, lo expresaremos diciendo que las construcciones interpretativas deben *obedecer a leyes lógicas,* lo cual apenas si afirma algo más que el que hayan de tener un significado relacional; pero en manera alguna exige este requisito que la proposición en la que entren construcciones interpretativas tenga que ser materialmente verdadera, que deba poseer una imagen o contrapartida existente. En cuanto a los detalles de la vinculación entre las construcciones interpretativas y la experiencia inmediata, vinculación que examinaremos con más detenimiento en el capítulo VI, están lejos de ser obvios.

Es difícil imaginar una teoría que viole totalmente la exigencia de fertilidad lógica; un sistema como el de Berkeley, que considera la percepción del hombre como un acontecimiento sucedido en la mente de Dios, constituye tal vez una apretada aproximación a este ideal negativo, ya que carecería de fertilidad lógica de no ser por la estructura racional de la mente divina. La apelación al hado ciego es otro ejemplo de esterilidad relativa, aunque no un ejemplo perfecto.

La falta de buenos ejemplos que violen completamente el requisito que nos ocupa no implica mengua alguna de su importancia. Las teorías

pueden, evidentemente, diferir en *grado* de fertilidad lógica, y el presente axioma nos inclina a conceder preferencia a la que la posea en mayor grado, supuesto que concurran igualmente todos los demás requisitos.

En virtud de esta condición, las leyes físicas pueden ser enunciadas como proposiciones universales desde las cuales sea posible efectuar el paso a casos particulares. Merced a esta exigencia de fertilidad lógica, términos tales como *masa, molécula* o *cromosoma,* son aptos para designar conceptos además de entidades individuales, el concepto general de número adquiere relevancia en la ciencia y, en el plano más elevado, las matemáticas se hacen aplicables a las construcciones interpretativas (aunque, ciertamente, el presente axioma no basta por sí solo para garantizar el buen éxito de las matemáticas en la ciencia).

En ningún lugar de la metodología de la ciencia encontramos motivo alguno convincente para la preferencia disfrutada por las lógicas bivalentes. La lógica aristotélica fue el primer tipo con que contamos, y ha sido utilizada de un modo casi exclusivo por los científicos hasta el momento presente [3], pero no existe razón alguna por la cual no pueda ser abandonada en alguna época futura. Así, la experiencia no puede demostrar ni refutar directamente la ley del tercio excluso *(tertium non datur);* de ahí que, sin duda alguna, se halle sujeta a una negativa provisional a usarla; pero hay algo que no puede hacerse, aunque a veces lo propugnen científicos y filósofos: no se puede dar por supuesto que *tertium datur* en ciertos sectores de la ciencia, tales como la teoría de la probabilidad y la teoría de los *cuantos,* y continuar luego utilizando sin mayor escrúpulo la forma tradicional de las matemáticas como si nada hubiera sucedido. Pues muchos de los resultados admitidos de las matemáticas se han obtenido hasta ahora sólo valiéndose de la lógica bivalente, y pueden ser incompatibles con los principios básicos de los cálculos polivalentes; es preciso, pues, demostrar primero la compatibilidad. Esto es particularmente cierto para todos los resultados establecidos por el método de la *reductio ab absurdum,* que fracasa cuando existen más de dos valores verdaderos.

Excepto en un modo muy general y sumario, la ciencia natural está enlazada a la lógica a través de las matemáticas. Para que una modificación en los axiomas lógicos sea eficaz en éstas, es preciso seguir su rastro a través de la estructura toda de las matemáticas. y tendrán que hacerse las necesarias modificaciones en ese campo; sólo entonces, aplicando las matemáticas modificadas a la ciencia empírica, se podrá juzgar del éxito del cambio realizado. Desgraciadamente, sin embargo, esto es más fácil decirlo que hacerlo, pues las matemáticas actualmente utilizadas en física *(v. gr.,* el cálculo diferencial o la teoría de operadores) no mantienen relaciones muy cordiales precisamente con la lógica, ni siquiera con la lógica bivalente: no se ha logrado una reducción completa

[3] A menos que estemos de acuerdo con RUSSELL, quien señala que esta lógica no justifica inferencias relacionales del tipo "si los caballos son animales, las cabezas de los caballos son cabezas de animales".

de una a la otra; continúa siendo problemática por el momento la compatibilidad de las matemáticas útiles con la lógica bivalente y resulta difícil predecir cuál haya de ser el destino final de las lógicas polivalentes.

5.4. El requisito de las vinculaciones múltiples (B)

A través de su definición, las construcciones interpretativas entran en relación mutua. (El proceso de definición merece una atención más detenida de la que le otorgamos en este punto, por lo que volveremos sobre él en el capítulo XII.) Prescindimos por el momento de su origen y centramos la atención en el carácter de las vinculaciones en que pueden intervenir las construcciones interpretativas, vinculaciones que pueden ser de dos clases, *formales* y *epistémicas.*

Una vinculación formal es la que coloca a una construcción interpretativa en una relación puramente lógica con otra, mientras que una vinculación epistémica equivale a una regla de correspondencia (de la que asimismo brota) que enlace la construcción con los datos. Ejemplos de vinculaciones formales son: todas las relaciones existentes entre magnitudes geométricas que sean demostrables sobre la base de un conjunto apropiado de axiomas, tales como las relaciones entre ángulos y lados de un triángulo, la ley del seno, la ley del coseno, etc., la relación entre un número y su cuadrado y la existente entre un círculo y su radio. También en física y en química toda vinculación entre entidades que pueda derivarse de postulados es de tipo formal; cabe citar como ejemplos la relación entre fuerza y aceleración de una masa dada (postulado: la ley de Newton), la relación entre la carga de un punto y su campo electromagnético (postulado: las ecuaciones de Maxwell), entre la curvatura del espacio y la cantidad de materia existente en el Universo (postulado: la ley de Einstein de la relatividad general), entre la temperatura y la energía cinética media de un gas (mecánica estadística de Gibbs), y entre la estructura de una molécula y su peso molecular. Cierto que las vinculaciones formales solamente son estables en tanto en cuanto se mantengan determinados postulados, que son en este sentido juicios hipotéticos; cierto también que su carácter formal resulta menos evidente cuando han quedado empíricamente comprobadas, como lo son muchas de ellas[4]; pero no tenemos por qué ocuparnos de tal cosa ahora.

Al lector se le ocurrirán, sin duda, abundantes vinculaciones epistémicas. Existen entre el árbol objetivo y lo que se denomina la visión de él, entre una fuerza y la percepción de una tensión muscular, entre

---

[4] Muchos físicos insisten en que la segunda ley de Newton, p. ej., es una relación empírica. En el capítulo XII veremos qué se quiere decir con tal aserción y por qué puede ser exacta sin invalidar el análisis que acabamos de hacer; baste decir ahora que la relación formal—ha de serlo debido a su carácter universal—tendría que ser abandonada, supuesto que no quedase también verificada en casos particulares.

el peso de un objeto y una lectura en una escala, entre una longitud de onda y la percepción de una línea en una placa fotográfica. Todas estas experiencias se enlazan mediante vinculaciones epistémicas: uno de los términos es una construcción interpretativa y el otro se encuentra en la Naturaleza. Existen algunos ejemplos de vinculaciones que son difíciles de clasificar, vinculaciones que son formales según una teoría y epistémicas según otra; mas, en vista de la gradual transición—que ya hemos hecho notar—entre la experiencia sensorial y las construcciones interpretativas, este hecho no tiene por qué preocuparnos. Y aquí encontramos de nuevo la posibilidad de diferentes interpretaciones de detalle; lo que importa es que cada interpretación produzca su propio e inequívoco conjunto de vinculaciones formales y epistémicas.

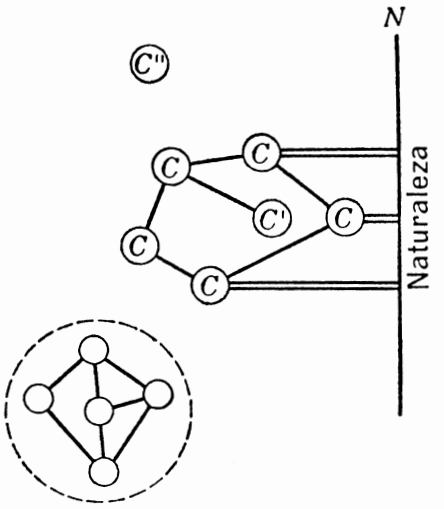


Figura 5.1

En la figura 5.1 hemos representado la Naturaleza, esto es, el agregado de todas las experiencias inmediatamente dadas, por una línea vertical, *N*. Las vinculaciones formales se indican con líneas sencillas, las epistémicas con líneas dobles; y todas las construcciones interpretativas están designadas por *C*, con o sin apóstrofes.

Las que no tienen apóstrofe alargan dos brazos, ya hacia otras construcciones, ya hacia la Naturaleza; podemos caracterizarlas como *múltiplemente vinculadas,* y toda construcción interpretativa utilizada en la ciencia natural es, como veremos, de este tipo, que permite el paso a través suyo en dos direcciones por lo menos. Por ejemplo, de la idea de electrón se puede pasar a su masa, a su carga, a su campo; desde su campo eléctrico se puede ir en una dirección hasta la idea de potencial,

y en otras direcciones hasta ciertos aspectos observables de la experiencia (a lo largo de líneas dobles). Es altamente instructivo seguir este nexo en toda teoría física.

Pero observamos también en la figura la existencia de cierta construcción interpretativa con *C'*, que es peninsular, que posee una sola conexión con una construcción interpretativa normal: cuelga suspendida dentro del sistema, y el significado que tenga provendrá solamente de un grupo coherente de otras construcciones interpretativas. Ejemplo de construcción peninsular es el color del electrón: ningún mal hay en atribuirle un color, pero no existe modo alguno de verificar este atributo, ya que no conduce a ningún otro conocimiento significativo por ninguna ruta formal ni permite comprobarlo mediante regla alguna de correspondencia. La única vía de salida de la idea se halla a lo largo de la línea que la constituyó originariamente, esto es, repitiendo la categórica afirmación: el electrón tiene color.

La construcción interpretativa *C''* carece de vinculación con cualquier otra y con la Naturaleza: es insular, y su inserción en un sistema teorético no cambia absolutamente nada. Un ejemplo de una construcción insular lo constituye el Dios del deísmo, que no tiene sitio en la ciencia. Puede haber también un grupo de construcciones interpretativas aisladas, mutuamente vinculadas, pero sin vinculaciones epistémicas, tales como las que se representan en la figura rodeadas por el círculo de trazo discontinuo. Cabe decir que forman un universo-isla, coherente en sí mismo, aunque inverificable. La ciencia engendra a veces inquietantes curiosidades de este tipo, y luego indaga posibles reglas de correspondencia que podrían darles significado; pero se las abandona de nuevo a menos que se encuentren tales reglas. En las dos últimas décadas se ha presentado un ejemplo de esto en la teoría de los *cuantos*. El principio de exclusión (véase el capítulo XX) exige que los estados de un grupo de ciertas partículas elementales, los electrones, por ejemplo, estén representados por funciones matemáticas que cambien de signo cuando se intercambien las coordenadas de dos partículas cualesquiera; esta exigencia da lugar a numerosas relaciones entre construcciones interpretativas, y estas mismas poseen contrapartidas en la Naturaleza. Es necesario ver ahora qué sucede al formular la condición contraria, a saber, que las funciones de estado conserven sus signos tras un intercambio de coordenadas de partículas elementales. Esta conjetura produce un interesante conjunto de relaciones, pero las entidades que entrarían en juego no corresponden a la experiencia inmediata: forman un universo-isla, y no se las considera actualmente como construcciones interpretativas válidas de la física.

Podría añadirse la interesante especulación, frecuentemente acariciada por los físicos, de que tal vez lleguen a descubrirse vinculaciones epistémicas que den base a estas conjeturas. Quizá existan en los confines del universo astronómico aún no explorado partículas que se sujeten a las reglas que acabamos de mencionar; la ciencia ha progresado en oca-

siones uniendo de este modo una isla con su cuerpo principal de conocimientos [5].

Puede ahora enunciarse brevemente el requisito metafísico que estamos examinando: las construcciones interpretativas admisibles en la ciencia deben estar múltiplemente vinculadas, no pueden ser insulares ni peninsulares; y es preciso excluir los conjuntos que formen un universo-isla.

Este axioma no tiende a dirimir todas las posibles contingencias futuras, pues debe admitirse la posibilidad de que surjan situaciones que dejen inerme la metodología establecida de la ciencia y en las que se precisen otras directrices nuevas y más concretas; la ciencia tendrá entonces que buscar a tientas un nuevo camino y modificar su metafísica a medida que avance. Es muy posible, incluso, que al lector se le haya ocurrido la pregunta de qué pasaría si solamente pudiera trazarse una *única línea* entre una de las *C* normales de la figura y una de las construcciones interpretativas de la isla. A decir verdad, las cosas presentarían entonces un cariz embarazoso no sólo para el filósofo de la ciencia, que trata de formular la metafísica de ésta, sino también para la ciencia misma. Y sucede precisamente que ésta es la situación con la que nos topamos actualmente en la física.

Según la teoría de DIRAC, un electrón puede hallarse en estados de energía cinética positiva y de energía cinética negativa, pero estos últimos no han sido observados jamás. Al principio se pensó que formaban un universo-isla y se prescindió inmediatamente de toda consideración a su respecto; pero, ¡ay!, la misma teoría puso de manifiesto que un electrón, reposando inofensivamente en un estado de energía positiva, puede pasar, en imperceptible tránsito, a uno de los estados recusables: había quedado trazada la línea en cuestión. De ahí se derivó una extraordinaria confusión en los sectores científicos; aun ahora los físicos suspenden el juicio definitivo respecto de la "realidad" de los mostrencos electrones de energía negativa, en espera de ulteriores pistas. Y muy pocos consideran que sea satisfactorio el estado de la teoría.

Antes de pasar al siguiente requisito hagamos una observación final. Una mirada a la figura 5.1 nos muestra que las construcciones interpretativas normales, *C,* no extienden invariablemente un brazo hacia la Naturaleza. Se asevera en ocasiones, aunque erróneamente, que todo elemento de una teoría física debe tener una contrapartida empírica *directa;* la teoría atómica, sin embargo, figura entre las que contradicen esta suposición, ya que, como hemos visto antes, no existe forma alguna de relacionar *directamente* con la experiencia los diminutos elementos constitutivos de la materia. Pero siempre ha de ser posible pasar (y lo es en la física atómica) desde una *C* aceptable a la Naturaleza *a través de*

---

[5] Para un ejemplo de construcciones insulares en la teoría de la relatividad, véase H. WEYL: *Philosophy of Mathematics and Natural Science,* Princeton de N. J., Princeton University Press, 1949, pág. 118.

otras C; en esta forma más mitigada, la proposición es consecuencia de nuestro requisito de las vinculaciones múltiples.

5.5. Los requisitos de permanencia y estabilidad (C)

Es indudable que no se pueden alterar arbitrariamente los elementos de una teoría para que encajen en la experiencia: lo que se admita una vez debe ser mantenido en lo que se refiere a todas sus consecuencias para la experiencia sensorial; habrá que juzgar de su verdad o falsedad en cuanto complejo lógico total, cuya estructura y reglas de correspondencia, que le dan importancia epistémica, tienen que ser permanentes. Así, unos conjuntos similares de impresiones exteriores no connotan un árbol en un caso y una roca en otro, como tampoco un árbol se convierte en una roca mediante manipulaciones teoréticas. Idéntica estabilidad se observa en los procedimientos de la ciencia natural, que no nos son tan familiares: una sensación luminosa no puede corresponder a una onda electromagnética en un caso y a una partícula en otro, como tampoco se transforma una partícula en onda cuando se la trata de conformidad con la teoría de los *cuantos*. Aun en esta rama de la ciencia, que tan frecuentemente ha sido objeto de graves malentendidos, una construcción interpretativa continúa siendo lo que fuese mientras se acepten las premisas de la teoría.

La presencia a que nos estamos refiriendo no es, desde luego, de tipo absoluto. Es frecuente modificar o rechazar teorías existentes, y se alteran las reglas de correlación en presencia de nuevos elementos de juicio; pero estas modificaciones se aplican luego universalmente a todos los casos, con lo que se niega esencialmente la libertad de utilizar aquí las antiguas reglas y allá las nuevas, según la conveniencia del investigador. Lo que en este punto denominamos permanencia, y que efectivamente se manifiesta como estructura permanente en una secuencia temporal de aplicaciones, adquiere un aspecto de uniformidad cuando se lo contempla como un principio uniforme en muchas aplicaciones simultáneas; pero, en cualquiera de ambos sentidos, esta permanencia no es ilimitada, según ahora advertimos: abarca el período de vigencia de una determinada teoría.

El proceso de conocer entraña otra cualidad digna de mención que se halla estrechamente relacionada con la permanencia, una cualidad que por esta razón queremos incluir bajo este mismo encabezamiento. Cuando yo veo un árbol estoy seguro de que es un árbol y no una roca, es decir, no abrigo la menor duda respecto a la regla de correspondencia que relaciona experiencia inmediata con los objetos; esto es, solamente puede surgir una incertidumbre en la identificación como resultado de ambigüedades existentes en la experiencia inmediata, no porque podamos elegir las reglas de correspondencia: éstas funcionan de manera clara e inequívoca una vez convertidas en máximas de la experiencia. Es,

por consiguiente, inexacto afirmar que un determinado complejo de datos sensibles se relaciona con los objetos de un modo sólo probable, y que una regla tiene más posibilidades de ser correcta que otras: los componentes *teoréticos* de la experiencia se consideran nítidamente definidos y singularmente determinables, mientras que los *inmediatos* están sujetos a defectos de claridad. Volveremos sobre esto en el capítulo VI.

Al manifestar nuestra posición admitimos la posibilidad de adoptar otra postura distinta, frecuentemente mantenida por los filósofos de la ciencia formados en la disciplina correlacional y que consiste en sostener que los datos están dados unívocamente y que las incertidumbres o probabilidades se introducen en virtud de procesos teóricos. No vemos razón por la que no *pudiera* edificarse sobre esta premisa una comprensión completa de la experiencia científica, pues si bien es necesario aflojar en algún punto la tensión de la correspondencia entre construcciones interpretativas y datos, con el fin de hacer posible la verificación en términos finitos, esto puede lograrse con igual justicia *a priori* del lado de la teoría que del lado de los datos.

Pero no estamos describiendo aquí lo que podría hacerse: estamos exponiendo lo que en la actualidad se hace en la ciencia deductiva; y de ahí nuestra toma de posición. Una teoría física define sus conceptos nítidamente—aunque a veces erróneamente—, los transforma por medio de inequívocas ecuaciones matemáticas y predice con exactitud. El rigor de tales predicciones se suaviza al final merced a la admisión de errores experimentales [6].

Nos parece que el requisito de que las construcciones interpretativas sean estables, requisito que, como ya hemos indicado, se postula abiertamente en la ciencia, concuerda asimismo del modo más fiel con la forma en que ordinariamente comprendemos al mundo; pues todos estamos dispuestos a admitir la limitación de nuestras percepciones sensoriales, y la consideramos una imperfección inevitable del conocimiento, en tanto que las análogas imperfecciones del razonamiento nos parecen errores que se pueden y deben evitar.

Resumiendo nuestra exposición, un tanto discursiva, del requisito *C:* las construcciones interpretativas engendradas en la explicación de un conjunto de experiencias inmediatas deben ser utilizadas, mientras se acepte la teoría de que formen parte, con el máximo respeto para la integridad de su significado en todas las aplicaciones: es preciso tratarlas como entidades lógicamente claras y nítidas, que pueden o no corresponder a situaciones empíricas claras y determinadas.

---

[6] Esta descripción es incompleta, puesto que rara vez hacen predicciones las teorías partiendo de premisas no empíricas: por lo regular "transforman" datos, o sea, parten de un conjunto de ellos y llegan a otro. Al hacer esto, sin embargo, las teorías no introducen por su parte incertidumbre alguna, salvo en lo que se refiere a las aproximaciones voluntarias efectuadas por quien ejecute los cálculos, sino que únicamente modifican las incertidumbres inherentes al conjunto inicial de datos. (En el capítulo siguiente nos ocuparemos de este punto con más extensión.)

5.6 El requisito de la ampliabilidad de las construcciones interpretativas (D)

Ninguno de los principios que hasta ahora hemos visto explica el expansivo impulso de la metodología física, el siempre creciente englobamiento de nuevos dominios por la ciencia. Por una parte, los científicos juzgan la calidad y, en último término, el acierto de una determinada teoría por su ámbito de aplicación, tomando la generalidad de un sistema como medida no sólo de su utilidad, sino también de su credibilidad. Por otra parte, en la creencia común de que, finalmente, una única teoría nos suministrará una explicación idónea de toda la experiencia se expresa la misma tendencia, el mismo juicio. La cuestión a tratar es nuestro intento de reducir a una base común de leyes físicas los descubrimientos de la biología, la psicología e, incluso, las ciencias sociales.

Para introducir este rasgo de la metodología de la ciencia anotamos, como cuarto requisito metafísico, la *ampliabilidad* de las construcciones interpretativas, cuyo significado específico queda claramente expuesto mediante una multitud de importantes ejemplos.

a. La más notable empresa de Galileo fue la formulación de una teoría que explicaba al caída de los objetos terrestres, teoría plenamente satisfactoria con respecto a los requisitos A, B y C. En un sentido limitado era también ampliable, ya que las ideas de masa y aceleración podían ser aplicadas a una gran variedad de cuerpos, esto es, a todos aquellos situados cerca de la superficie de la Tierra; sin embargo, el descubrimiento por Newton de la ley de la gravitación universal obtuvo un aplauso mucho más dilatado, porque era más *ampliable,* ya que incluía dentro de su ámbito los cuerpos celestes. Al formular la idea de una fuerza gravitatoria actuante entre *todas* las partículas y que variaba en relación inversa al cuadrado de la distancia, Newton aportó un concepto de impresionante amplitud, y contribuyó con ello de un modo decisivo al progreso de la ciencia de la mecánica.

b. Cuando la relatividad *especial* quedó rebasada por la teoría *general* de la relatividad se logró un progreso similar. Aquélla se había visto obligada a adoptar la noción especial de las fuerzas newtonianas, si bien tratándola de una forma característica y más fructífera, cuyas virtudes quedaron de manifiesto del modo más evidente allí donde se limitaba a los sistemas inerciales[7]; cosa que había conducido a la distinción entre dos clases de fuerzas: las causadas por agentes físicos *(v gr.,* la gravitación, que es debida a la atracción de la tierra) y las causadas por el simple movimiento del cuerpo sometido a consideración *(v. gr.,* la fuerza centrípeta). Independientemente de esto, el éxito de la teoría especial como sistema explicativo fue muy satisfactorio. Pero luego, generalizando los axiomas de la geometría, Einstein puso de relieve que todas

[7] Los sistemas inerciales son los que se mueven sin experimentar aceleración alguna con respecto a la posición media de las estrellas fijas.

las fuerzas podían ser consideradas como pertenecientes a la segunda especie; y la gravitación, que anteriormente gozaba de un *status* propio, aparecía ahora como un caso más de una construcción interpretativa más ampliable: la curvatura del espacio-tiempo.

c. En el terreno de la química se han efectuado a menudo transformaciones parecidas. El concepto de enlace de valencia pareció durante mucho tiempo irreductible; sin embargo, pese a su éxito, dejaba insatisfechos a los químicos por su incapacidad para ser suficientemente ampliable: explicaba cómo se unen los átomos para formar moléculas, pero muy poco más. Y se experimentó una especie de alivio cuando, en 1927, HEITLER y LONDON demostraron por primera vez que las fuerzas de valencia no son sino meros ejemplos o manifestaciones de una idea más ampliable, la de interacción cuántica entre cargas eléctricas.

d. Las tendencias expansivas se manifiestan igualmente en las ciencias de la vida. El vitalismo, por ejemplo, ha caído en descrédito no porque proporcione una comprensión inadecuada de los hechos de la biología—lo cual no es del todo cierto—, sino porque afirma la autonomía y la no ampliabilidad de las construcciones explicativas biológicas, con lo que infringe el requisito de ampliabilidad. De modo parecido, los adversarios del conductismo, incapaces frecuentemente de encontrar efectivas imperfecciones en los métodos y resultados de ese movimiento, apoyan, al parecer, su acusación de modo fundamental en la especial e inampliable naturaleza de los supuestos del conductista, y en su renuencia a servirse plenamente de los aspectos teóricos de la neurofisiología y de la química: la relación estímulo-respuesta, tan fundamental en esta teoría, queda deliberadamente limitada a los seres vivos.

Los conflictos de este tipo, cuando se los presenta como asentados en hechos derivados de la observación, ofrecen frecuentemente un cariz confuso y una difícil solución. Es preciso poner aquí de relieve que la cuestión a debatir es la de si el vitalismo, el conductismo o muchas otras doctrinas interpretativas contradicen o satisfacen un requisito *metafísico,* cosa que sólo puede resolverse analizando toda la metodología de la ciencia, en su conjunto; dicho de otro modo: difícilmente puede resolverse, en absoluto, a menos que lleguemos a un consenso más general respecto a las cuestiones de que nos estamos ocupando ahora. Y el debate en torno al vitalismo, como muchas otras controversias de tipo general, hace destacarse con gran claridad la importancia de que reconozcamos la presencia y efectos en la ciencia de principios metafísicos.

e. Examinemos finalmente un ejemplo en el que se hace decisiva la necesidad del enfoque metodológico. La ciencia se ha desarrollado, y continúa desarrollándose, sin someterse conscientemente a fiscalización filosófica; pero el autor cree firmemente que podría desarrollarse con mayor rapidez si se prestara atención a los principios que la han guiado de modo inconsciente en el pasado. La física, tras haber experimentado gran número de erráticos cambios de rumbo en su historia reciente, se

halla en la actualidad impregnada del *slogan* que afirma que estamos obligados a buscar *leyes de la naturaleza diferentes en distintas escalas de magnitud:* el núcleo atómico, se dice, tiene que describirse mediante reglas apropiadas a los dominios del orden de 10^{-12} centímetros en dimensiones lineales, reglas que hasta el momento no se han descubierto todavía; los átomos mismos, y otras entidades físicas cuyo tamaño es del orden de los 10^{-8} centímetros, se hallan sometidos a las leyes de la mecánica cuántica; los cuerpos de dimensiones corrientes se rigen por la mecánica newtoniana, y las estrellas y las galaxias poseen un comportamiento peculiar y característico. Una ojeada a la Historia y a los principios que han actuado sobre el desarrollo de la ciencia manifiestan

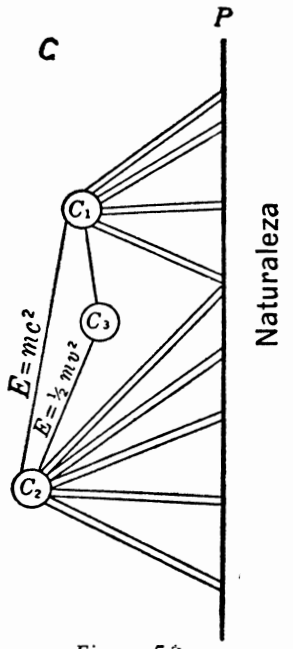


Figura 5.2

de modo indudable el carácter irresponsable de tales *clichés,* y puede esperarse que el respeto a estos principios, particularmente al requisito de ampliabilidad que estamos examinando, actúe a modo de freno sobre los esfuerzos, tan indebidamente multiplicados, que se producen siguiendo la dirección de "leyes especiales para dominios físicos especiales".

Hemos visto desde cierta distancia el principio de ampliabilidad en acción; no estaría de más que lo observásemos ahora más de cerca. Recordemos que las construcciones interpretativas entran en dos tipos de relaciones: con la Naturaleza y con otras construcciones; y de ahí que deban ser ampliables en estos dos sentidos. Esto queda representado gráficamente en la figura 5.2, en la que se ven dos construcciones interpre-

tativas que son centrales en la mecánica, la masa (C_1) y la energía (C_2). La masa se ha ampliado, merced a las reglas de correspondencia (líneas dobles), no meramente hasta las legendarias piedras que GALILEO dejó caer desde la Torre inclinada de Pisa o hasta la manzana de NEWTON en Woolsthorpe, sino hasta abarcar todos los demás cuerpos materiales, la Luna, los planetas, las estrellas y, finalmente, la electricidad y la luz; en cuanto a la energía, puede ser identificada con datos empíricos igualmente numerosos: se sabe que la poseen todos los cuerpos en movimiento, la electricidad y la luz. Por ello es tan grande el número de enlaces dobles que se extienden desde C_1 y C_2 hasta la Naturaleza. Las construcciones interpretativas deben ser ampliables, ante todo, en este sentido.

Existen además relaciones mediatas entre C_1 y C_2 a través de otras construcciones, tales como C_3. Si C_3 representa la velocidad (la figura omite sus reglas de correspondencia), la ecuación energía cinética$=\frac{1}{2}mv^2$ es un ejemplo de tal relación. Uno de los más importantes logros de EINSTEIN fue proporcionar un enlace más directo entre C_1 y C_2, enlace que aparece en la famosa relación entre la masa y la energía, que afirma que toda masa es equivalente a una cantidad proporcionl de energía; la idea de masa se ha ampliado, pues, por su parte, hasta el punto de incluir la energía, o, lo que viene a ser lo mismo, la de energía se ha ampliado hasta incluir la masa.

Al llegar este momento, el requisito de ampliabilidad patentiza una íntima afinidad con *B*, el requisito de las vinculaciones múltiples: ambos se cumplen en el mismo acto creador, pues si bien EINSTEIN se limitó a introducir una nueva relación, sucedía que se trataba de una relación de equivalencia que permitía la fusión de dos construcciones interpretativas, y, por ende, la ampliación de una cualquiera de ellas. La grandeza de este descubrimiento deriva del insólito modo en que satisface un anhelo metafísico, y todo científico la advierte instintivamente.

La figura 5.2 aclara plásticamente una pequeña parte de la mecánica, si bien casi cualquier otra teoría de la física podría también haber servido para poner de manifiesto el significado del requisito D, que acabamos de estudiar.

5.7. EL REQUISITO DE CAUSALIDAD (E)

En todo libro existen puntos en los que el modo de exposición necesita ser distinto según se pretendan satisfacer las exigencias del desarrollo sistemático o las finalidades pedagógicas; hemos llegado ahora a uno de tales puntos. La causalidad es, efectivamente, uno de los requisitos metafísicos de la teoría física y, por consiguiente, deberíamos tratarlo en este momento, pero su estudio detallado afecta a cuestiones técnicas que nos demorarían indebidamente en este lugar; mejor será, pues, que lo dejemos para examinarlo más adelante (en el capítulo X). Por esa razón ofrecemos aquí un mero esbozo preliminar de tal requisito.

Vamos a utilizar la palabra *causalidad* en un sentido muy específico, no con el cuádrupe significado que le dio ARISTÓTELES (causas formal, material, eficiente y final) ni con la abundante proliferación de causas que tuvo lugar en el siglo XVII [8], sino que representará una relación que sigue el viejo modelo "si *A*, entonces *B*". Es necesario, sin embargo, proyectar luz sobre ciertas oscuridades existentes en esta relación. Debe sobre todo aclararse si *A* y *B* representan experiencias inmediatas (esto es, datos) o construcciones interpretativas y en este último caso, si son *objetos* o *estados* de objetos. También hay que eliminar la ambigüedad inherente al "si" y al "entonces", pues tal vez no aparezca claro sin ulteriores precisiones si estas partículas se han de tomar en sentido condicional o temporal.

Las respuestas que aquí damos distan mucho de ser evidentes a primera vista: no cabe duda de que exigen una justificación (capítulo XIX). Queremos considerar la causalidad como una relación entre construcciones interpretativas, en particular como una relación entre *estados* [9] —o sea, situaciones—de sistemas físicos. El principio de causalidad afirma que a un estado dado le sigue invariablemente en el tiempo otro estado especificable. Aun sin más detenidos análisis, se verá que esta formulación posee dos virtudes: es precisa y terminante, y refleja las mejores normas seguidas en las ciencias exactas; y esperamos poder demostrar más adelante que otras concepciones más usuales de la causalidad, en la medida en que estén dotadas de significado, pueden siempre reducirse a ésta.

Se dice que el rayo es causa del trueno, o éste efecto de aquél; pero tomar esta relación como si existiese entre fenómenos inmediatamente percibidos presenta numerosos inconvenientes. En primer lugar, va en contra de la costumbre, ya que lo que se quiere decir es que el rayo es causa del trueno aun cuando no se lo vea. Además, es difícil en esta interpretación orillar los poderosos argumentos del empirismo, que ve en la causalidad simplemente una sucesión de experiencias abrumadoramente frecuente; y esto es precisamente lo que sería la relación causal si causa y efecto no se tomaran como construcciones interpretativas.

En el sentido que estamos patrocinando, el rayo es una situación de la atmósfera susceptible de ser descrita a base de magnitudes físicas tales como intensidades de campos eléctricos, densidades iónicas, excitación de átomos y moléculas y luminosidad. De hecho, todas estas son cantidades mensurables. Existen leyes por las que puede inferirse, como consecuencia de aquella situación, otra del mismo medio ambiente que describimos como trueno y está caracterizada por otras cantidades también mensurables, *v. gr.*, una variación rítmica de cierta densidad. Si esta situación se presenta con suficiente frecuencia decimos que las leyes

---

[8] Véase A. WOLF: *Spinoza's Short Treatise*, A. C. Black, Ltd., Londres, 1910.

[9] Los estados son construcciones interpretativas especiales, de las que nos ocuparemos más cuidadosamente en el capítulo VIII.

son válidas y que son *leyes causales*. Ciertamente, la causalidad es, entonces, una propiedad de las leyes físicas, y no de las observaciones.

Estamos empleando ahora la palabra *situación* de modo un tanto impreciso. Más adelante veremos (en el capítulo VIII) que toda teoría contiene o engendra construcciones interpretativas que pueden emplearse para designar unívoca y completamente los estados de los sistemas físicos. La causalidad se refiere solamente a estados definidos en relación a variables significativas de este tipo, y así la hemos de entender siempre aquí. Por ejemplo, la situación mecánica de una partícula material que pueda entrar adecuadamente en vinculación causal con otros estados está definida a base de la posición y la velocidad: carece de relevancia para la descripción causal de la mecánica que la partícula sea azul o que huela mal, mas, de otro lado, su color azul puede ser una situación causal apropiada por lo que se refiere a una teoría de la óptica. Vemos, por consiguiente, que la palabra situación necesita ulteriores limitaciones y que se la haga alinearse cuidadosamente con los demás componentes de una determinada disciplina; lo que importa en esta fase de nuestro análisis, sin embargo, es que pueden existir leyes que den origen a situaciones que muestran un enlace invariable en el tiempo y otras leyes que carezcan de semejante virtualidad.

Sostenemos que la causalidad es un requisito metafísico, que exige que las construcciones interpretativas se elijan de modo que *engendren leyes causales.*

No es necesario revisar esta apreciación del postulado causal en relación con la física moderna, que, según se afirma frecuentemente, ha puesto fin a la causalidad, pues la teoría cuántica nos habría enseñado a negarlo como relación estricta entre perceptibles inmediatos. Es cierto que la impropiedad de ese enfoque debía haber sido plenamente evidente para los estudiosos de las ciencias físicas y así lo fue, en efecto, ya que HUME lo destruyó mucho antes de que intentaran siquiera hacerlo HEISENBERG y BORN; pero la aportación de estos últimos autores ha tenido también la máxima importancia y significación, ya que ha puesto de relieve qué extrañas e inesperadas propiedades deben poseer los *estados* de los sistemas físicos para estar causalmente relacionados.

5.8. LA SENCILLEZ Y LA ELEGANCIA (F)

El más desconcertante de los requisitos metafísicos es el que suele denominarse postulado de sencillez, ya que es más esquivo y difícil de enunciar que todos los demás. Cuando dos teorías se presentan simultáneamente como explicaciones competentes de un determinado complejo de experiencias sensoriales, la ciencia decide en favor de la "más sencilla". Se cita frecuentemente a este respecto el triunfo del sistema astronómico copernicano sobre el geocéntrico. PTOLOMEO, cuyo *Alma-*

gesto contenía la más acertada explicación de los movimientos siderales y planetarios, adscribió a cada cuerpo celeste un derrotero circular (epiciclo), el centro del cual giraba sobre otro círculo (deferente) en torno a la Tierra; era necesario un gran número de epiciclos no relacionados entre sí para explicar las observaciones, pero de todas maneras el sistema era útil y se hallaba dotado de precisión cuantitativa. COPÉRNICO, al situar el sol en el centro del sistema planetario, pudo reducir el número de epiciclos de 83 a 17, si bien le fue imposible su completa eliminación, debido a suponer que las órbitas de los planetas eran circulares, no elípticas (KEPLER). La historia indica que COPÉRNICO no se percató de los aspectos fundamentales de su llamada "revolución", ni tampoco, posiblemente, de su importancia histórica, sino que se contentó con haber creado un esquema *más sencillo* de predicción. El descubrimiento heliocéntrico posee un peculiar atractivo como ilustración del principio de sencillez porque permite la aritmetización de ésta: implica una reducción en el número de epiciclos de 83 a 17.

Desdichadamente, sin embargo, existen pocos casos en los que la situación sea tan clara e inequívoca. La teoría electromagnética de la luz superó la hipótesis del éter luminífero porque era más sencilla; pero, ¿qué es lo que hay que tener en cuenta en esta situación? Muy probablemente, lo que de aquí surge viene ya dado por los precedentes postulados de nuestra lista, principalmente por los de ampliabilidad y vinculaciones múltiples; parece, por consiguiente, dudoso que se necesite otro postulado sobre un terreno lógico, si bien no se produce ningún perjuicio por añadirlo. Nuestra incapacidad para contar las ideas, que hace que lo sencillo sea tan esquivo, impide también una clasificación interrumpida, discontinua, de nuestros principios metodológicos.

Históricamente, la sencillez fue tempranamente reconocida como motivo guía de la investigación; y la navaja de OCCAM es quizá el medio más celebrado para efectuarlo: *"Non sunt entia multiplicanda praeter necessitatem."* El profesado nominalismo del *doctor invincibilis* ha impregnado esta sentencia, en su origen, de cierta parcialidad filosófica, que se mantiene aún en su más moderna versión de economía del pensamiento. Mas, en realidad, carece de coloración alguna: es una lisa y llana profesión de fe por parte de los que buscan el conocimiento científico, dado que expresa de cierta manera la totalidad de los requisitos metafísicos en juego. KEPLER[10] la proclamó a menudo: *"Natura simplicitatem amat"; "amat illa unitatem"; "nunquam in ipsa quicquam otiosum aut superfluum exstitit"; "natura semper quod potest per faciliora, non agit per ambages difficiles";* PLANCK, EINSTEIN y CASSIRER, entre otros muchos, la han confesado fervientemente; nos inclinamos, pues, ante la Historia, e incluimos la sencillez en nuestra lista.

---

[10] Véase I. HART: *Makers of Science: Mathematics, Physics, Astronomy,* Nueva York, Oxford University Press, 1924.

Existe también un elemento estético, íntimamente unido a la sencillez, que hemos de separar dentro de la metafísica de la ciencia: algunos descubrimientos son bonitos, otros son hermosos y terribles; palabras que el científico emplea a menudo para expresar su satisfacción estética. El éxtasis creador, que proverbialmente constituye la recompensa del artista, es en igual medida adecuado al logro científico, como testimonian ampliamente las manifestaciones orales y escritas del genio científico: llega como un glorioso cumplimiento de las expectativas que la sensibilidad a las exigencias metafísicas de la ciencia había infundido en el investigador. Mas es discutible si estamos tratando en este momento de cosas relevantes para la metodología: tal vez nos hayamos deslizado gradualmente hacia los dominios de la psicología.

Terminamos así la exposición de la metafísica de la ciencia. ¿Qué es lo que hemos conseguido? El lector realista, que sospechaba desde el principio que estábamos enfocando las materias científicas desde un punto de vista un tanto subjetivo, tal vez encuentre ahora confirmadas sus sospechas: tal vez se oponga a la premisa básica que estampilla los conceptos de la ciencia como algo muy próximo a las invenciones. En realidad, muy bien puede interpretarse como idealista la posición hasta ahora bosquejada en la presente obra; y si las certidumbres de la experiencia científica son meras *construcciones interpretativas,* el crítico preguntará: ¿de dónde obtiene la ciencia la estabilidad que evidentemente posee?; ¿por qué pretende poseer *hechos* en un sentido más sólido que otras disciplinas? Y llegará a la conclusión de que si nuestra epistemología, amorfa por sí misma, no echa un ancla en la "realidad", flotará dentro de la experiencia como una masa gelatinosa en el océano.

Para contestarle, vamos a plantear, en primer término, una objeción frente a la orientación aparentemente inocua introducida en el razonamiento por la simple palabra "meras"; pues en líneas generales, los elementos de las teorías científicas son innegablemente construcciones interpretativas, pero no *meras* construcciones de esta índole, como lo serían unas invenciones ociosas: no deben su existencia al capricho o a puro accidente, sino que se mantienen en correlación uniforme con la experiencia inmediata; y después de su nacimiento se ven sometidas a un rigurosísimo régimen de principios metodológicos. Estas restricciones bastan para eliminar lo que pudiera haber de "meridad" o gratuidad en la naturaleza de las construcciones interpretativas científicas; su validez científica y su carácter de completamente dignas de crédito, sin embargo, les están conferidos por nuevos procedimientos aún más limitadores y exigentes: por una continua prueba o contrastación con la experiencia inmediata, a la que llamamos *confirmación.* Nos proponemos analizar esta última en el capítulo siguiente, donde se verá cómo se transforman las construcciones interpretativas que acabamos de introducir en lo que denominaremos *verifactos;* y esperamos poner luego claramente de manifiesto cómo estas construcciones científicas, en vez de vagar y deslizar-

se erráticamente por la experiencia, sin echar anclas en ella, cuajan y se condensan en la más firme especie de realidad que conocemos [11].

RESUMEN

Para que las pueda admitir la ciencia, así como el sentido común, las construcciones interpretativas tienen que satisfacer dos clases de condiciones: la primera es de tipo formal, y requiere que todo sistema explicativo posea una coherencia y una fertilidad lógicas que no están conferidas por los solos datos sensoriales; la segunda condición exigida se refiere a la verificabilidad empírica, problema que examinaremos en el capítulo siguiente.

Los requisitos formales reciben aquí la denominación de metafísicos, pues su función se aproxima mucho al papel que desempeñó la metafísica en los antiguos sistemas de filosofía. Hemos analizado estos requisitos en una gama de seis axiomas o postulados más o menos específicos (A a F), que no son totalmente distintos, sino que se funden en un sistema al que cabría denominar la lógica de la ciencia teorética.

BIBLIOGRAFIA

BORN, M.: *Experiment and Theory in Physics,* Londres, Cambridge University Press, 1944.

BRIDGMAN, P. W.: *The Nature of Physical Theory,* Princeton de N. J., Princeton University Press, 1936.

BROAD, C. D.: *Perception, Physics and Reality,* Londres, Cambridge University Press, 1936.

BROAD, C. D.: *Scientific Thought,* Nueva York, Harcourt, Brace and Company, Inc., 1923 [vers. cast.: *El pensamiento científico,* Madrid, Tecnos, 1963].

BURTT, E. A.: *Metaphysical Foundations of Modern Physical Science,* Nueva York, Harcourt, Brace and Company, Inc., 1927.

DE BROGLIE, L.: *Continu et discontinu en physique moderne,* París, Albin Michel, 1914.

DINGLER, H.: *Die Grundlagen der Physik,* Berlín, Walter De Gruyter & Company, 1932.

---

[11] La concepción que aquí expresamos está documentada en los escritos de destacadas figuras de la física moderna. Dice, p. ej., DE BROGLIE: "*Si tranchée que paraisse à première vue la distinction entre la découverte expérimentale et l'invention théorique, une étude plus attentive ne tarde pas à l'attenuer considérablement: car elle montre que la découverte des faits expérimentaux, du moins dans la science actuelle, est à bien des égards une invention tandis que l'invention théorique est en quelque mesure une découverte.*"

Max BORN, en *Experiment and Theory in Physics,* Londres, Cambridge University Press, 1944, dice: "Yo creo que no existe en la ciencia ninguna autopista que esté jalonada por postes indicadores epistemológicos: no, nos encontramos en una jungla y nos abrimos paso a fuerza de ensayos y equivocaciones, construyendo la carretera *tras* de nosotros, a medida que avanzamos. No *encontramos* postes indicadores en las encrucijadas, sino que nuestros propios batidores los *plantan* para ayudar a los demás. ...Mi consejo a los que quieren aprender el arte de la profecía científica es que no se apoyen en la razón abstracta, sino que descifren el lenguaje de la Naturaleza contenido en los documentos de la Naturaleza, los hechos de la experiencia."

EDDINGTON, A. S.: *Fundamental Theory,* Londres, Cambridge University Press, 1948.
LINDSAY, R. B.: "The Meaning of Simplicity in Physics", *Phil. Sci.,* 4:151 (1937).
MACH, E.: *The Analysis of Sensations,* La Salle de Ill., The Open Court Publishing Company, 1914.
PEIRCE, C. S.: "Principles of Philosophy", Collected Papers, vol. I, editados por C. S. Hartshorne y P. Weiss, Cambridge, Mass., Harvard University Press, 1931.
SMITH, N. K.: *A Commentary to Kant's Critique of Pure Reason,* Londres, Macmillan & Co., Ltd., 1923.
SPAULDING, E. G.: *The New Rationalism,* Nueva York, Henry Holt and Company, Inc., 1918.
STRONG, E. W.: *Procedures and Metaphysics,* Berkeley, University of California Press, 1936.
URBAN, W. M.: *Language and Reality,* George Allen & Unwin, Ltd., Londres, 1939 [vers. cast.: *Lenguaje y realidad,* México, F. C. E., 1952].
WEYL, H.: *Philosophy of Mathematics and Natural Science,* Princeton de N. J., Princeton University Press, 1949. Véanse especialmente las secciones 20 y 21.

CAPITULO VI

LA CONFIRMACION EMPIRICA

6.1. El circuito de la confirmación empírica

Las reglas de correspondencia actúan de dos maneras. Nos permiten pasar desde la Naturaleza al campo de las construcciones interpretativas y, cuando se utilizan en sentido inverso, nos proveen de *expectativas.* En este último aspecto proporcionan lo que Lewis [1] ha llamado, muy acertadamente, "juicios terminales"; pero las inversiones de dirección necesitan, sin embargo, ser objeto de un estudio más detenido ya que pueden realizarse de forma trivial o no trivial.

Una inversión trivial de una regla de correspondencia tiene lugar cuando se rehace el camino que condujera originariamente a formar una construcción interpretativa. Así, ver un árbol es un acto que, aunque completo en sentido psicológico, implica los heterogéneos elementos de la percepción inmediata y la formación constructiva: sirve para constituir el objeto exterior, el árbol; pero si, después de haber visto un árbol y haber mirado luego a otra parte, me vuelvo en la primera dirección y espero verlo, esa expectativa es una inversión trivial de una regla de correspondencia. Otra del mismo tipo es que el sol saldrá mañana, o que el café dulce contiene azúcar, o que una descarga eléctrica en vapor de mercurio será de color verde.

Pero supongamos que oímos el sonido de un timbre y, recordando la física elemental, contamos con que se trata de un movimiento vibratorio en el aire circundante. Una breve reflexión basta para llevarnos a la conclusión de que si no hubiese aire no podrían existir las vibraciones y el timbre no podría oírse; por ello, picados de curiosidad, colocamos el timbre debajo de una campana, hacemos el vacío en ella mientras suena el timbre y descubrimos que el sonido se va extinguiendo lentamente.

Al "predecir" esto hemos realizado el siguiente y pequeño ejercicio: partiendo del sonido percibido en la Naturaleza hemos avanzado, en virtud de cierta regla, hasta las construcciones interpretativas aire y vibración (de hecho, hasta la proposición: el aire está vibrando); y desde una hipotética negativa de esta proposición cabe regresar a la Naturaleza mediante la misma regla de correspondencia, la cual implica entonces

[1] C. I. Lewis: *An Analysis of Knowledge and Valuation,* La Salle de Ill., The Open Court Publishing Company, 1947.

la ausencia de sonido. En nuestro ejemplo la negativa ha estado impuesta por la eliminación del sujeto de la proposición, esto es, por la extracción del aire: ha sido una inversión no trivial, o, mejor, un regreso no trivial a la Naturaleza [2].

Si bien es interesante efectuar una disección de la estructura lógica de éste y otros ejemplos de predicción, el gran número de detalles a tener en cuenta es suficiente para impedirlo, por lo que seguiremos la costumbre establecida y lo evitaremos. El movimiento metodológico aparece con toda claridad: pasa desde la percepción hasta el terreno de las construcciones interpretativas, donde experimenta una transformación lógica, y regresa luego a la percepción. La transformación, esto es, el tránsito desde un elemento hasta otro dentro de la esfera de tales construcciones, caracteriza el regreso como no trivial.

A efectos de una mayor sencillez terminológica, podemos denominar campo P a la clase de todas las percepciones que puedan entrar en la experiencia, y campo C a todas las construcciones interpretativas, permitiéndonos de este modo un uso del término *campo* que es descriptivo, aunque no exacto en sentido técnico matemático. El campo P es idéntico a la Naturaleza y podríamos representarlo como una superficie de dos dimensiones, de conformidad con la ausencia de profundidad analítica que es característica de las percepciones; en cuanto al C, hemos de considerarlo como una especie de continuo tridimensional dotado de estructura racional. El movimiento que antes hemos bosquejado representa entonces un circuito que comienza en P, se desplaza a un punto de C (C_1, por ejemplo), sigue hasta otro punto de C (tal como C_2) y desde ahí hasta cierto punto de P. Cuanto mayor sea la distancia entre C_1 y C_2 mayor será el alejamiento de la trivialidad en el circuito.

Unos cuantos ejemplos aclararán el significado de estos circuitos (el orden en que los presentamos está escalonado siguiendo el aumento de la distancia entre C_1 y C_2).

a. Vemos una piedra. La idea de piedra implica la de la materia con todos sus atributos lógicos, tales como el de dureza; y esto conduce a la expectativa o predicción de que la piedra percibida será dura al contacto con la mano.

b. Vemos el sol. El sol es un cuerpo astronómico sometido a ciertas leyes teóricas; de ahí la conclusión de que alcanzará su máxima altura al mediodía.

c. Un objeto que caía suscitó en NEWTON la conjetura de que las masas se hallan sometidas a la ley de la gravitación universal; y determinados procedimientos analíticos, que fueron posibles merced a la

---

[2] Esta última frase será preferible par el lector meticuloso que comprenda que la regla empleada en el regreso es distinta de la primera, ya que dice que no-*B* implica no-*A*, mientras que la primera dice que *A* implica *B*. Es interesante e importa mucho justificar esta transformación lógica en términos simbólicos, si bien el científico rara vez se detiene a hacerlo, confiando en que su intuición matemática lo mantendrá a flote.

teoría de las "fluxiones"[3] y que implicaban construcciones adicionales tales como la distancia entre la Tierra y la Luna, le llevaron a "predecir" el período de revolución de la Luna.

d. El físico estudia las *líneas espectrales* emitidas por una sustancia llamada sodio. Tras haber reunido un amplio conjunto de elementos de juicio empíricos, se ve en situación de construir, utilizando reglas de correlación que tienen a su favor el haber resultado fructuosas en otros casos, una disposición ordenada de cargas eléctricas denominada átomo de sodio; y sobre la base de una ulterior investigación teórica considerablemente laboriosa y de gran complejidad matemática, pero sin que en lo esencial pueda guiarse por otros datos empíricos, formula una predicción (aparentemente sin relación alguna con aquellos elementos de juicio) concerniente al *índice de refracción* del vapor de sodio.

e. El físico nuclear, estudiando los pesos atómicos de todos los elementos, observando los componentes de los núcleos, advirtiendo la dispersión de una clase de partículas nucleares por otras, etcétera, concibió primeramente la idea de la existencia de una extraña fuerza entre los nucleones. La cuestión quedó algún tiempo estancada ahí; pero la nueva fuerza, aunque proveniente de respetables e ineludibles correlaciones epistémicas, carecía, en lo fundamental, de todo enlace con otras construcciones interpretativas, por lo cual se tenía la sensación de que *le faltaba una explicación.* El físico se encontró desorientado, sin poder hacer apenas nada más que regresos completamente triviales a la Naturaleza. Todo esto cambió con una aguda idea de YUKAWA, que dijo: tiene que haber "mesones", que han de descubrirse observando ciertos hechos sensibles de la Naturaleza. Y así fue, en efecto.

La forma metodológica de estos ejemplos se hace visible (un tanto ingenuamente) en la figura 6.1, que representa lo que los científicos llaman predicción. Se comienza en algún punto del campo de la percepción, P_1; nuestra investigación se dirige luego, a lo largo de las reglas de correspondencia, R, al campo de las construcciones interpretativas; queda englobado aquí en relaciones lógicas, con lo que logra significado y alcance; y, finalmente, retrocede a lo largo de otras reglas de correspondencia hacia P_2 (un segundo punto de P), que se dice es el objeto de la predicción[4]. La combinación de las construcciones interpretativas utilizadas en este movimiento (que son las incluidas dentro de la línea circular del diagrama) forma una teoría.

Se ve, pues, que las condiciones que hacen posible una predicción son de dos clases: el conocimiento empírico simbolizado por P_1 y el conocimiento racional simbolizado por las construcciones interpreta-

[3] Es la denominación dada por NEWTON al cálculo diferencial.

[4] La palabra *predicción,* tal como se usa en la ciencia, no significa "pronóstico" en un sentido temporal. *Pre-* implica "anterior al conocimiento completo"; no es opuesto a *post-* como lo es *ante-*. El opuesto a *pre*fijo no es postfijo, sino *su*fijo. Es, por consiguiente, innecesario acuñar una nueva palabra, *postdicción,* para denotar lo que podríamos llamar predicción del pasado. El uso de esta palabra, por más que se la haya propuesto, parecería un poco *prepóstero.*

tivas. No es posible ninguna predicción cuando falta uno de los dos, de modo que la pretensión del racionalista, que quiere omitir la primera parte del viaje y empezar dentro de *C*, es tan fútil como la del empirista, que cree ir directamente de P_1 a P_2. Y, sin embargo, es notable cuán cerca están ambos de la verdad. No es completamente erróneo decir con H. COHEN: *"Nur das Denken kann erzeugen, was als Sein gelten kann"*; ni tampoco convierte en falsa nuestra descripción el insistir, con LOCKE, en que: *"Nihil est in intellectu quod non prius fuerit in sensu"*.

Podemos interpretar de otra manera el circuito trazado en la figura 6.1. Hasta ahora, sólo funcionaba como predicción si la teoría a través de la cual pasaba estaba ya aceptada; en cambio, la otra interpretación concibe el circuito como un procedimiento para *asentar una teoría*: implica empezar simplemente con una aceptación meramente provisional de esa teoría y considerar el paso a P_2 como un desafío a la Naturaleza. Si se hace frente al desafío, se dice que le teoría queda confirmada o verificada en este caso; y la teoría es *válida* si queda confirmada o verificada en un número suficiente de casos. Además, las construcciones

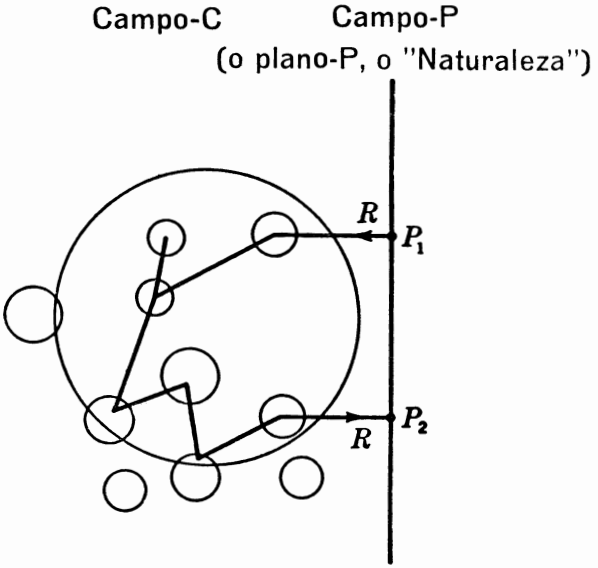


Figura 6.1

interpretativas, que forman parte de una teoría válida se denominarán construcciones válidas, o verifactos. *Los procesos de validación, al conjugarse con los requisitos metafísicos examinados en el capítulo anterior, crean el conocimiento científico. Es este purgatorio de la validación lo que elimina de las construcciones interpretativas el estigma de ficción que les fue impuesto en origen por su génesis epistemológica.*

Pero esto nos deja dos cuestiones por resolver: 1.ª) ¿cuándo es suficiente el número de ejemplos?; 2.ª) ¿qué es lo que constituye la

concordancia entre la teoría y la observación? Esta última es una cuestión particularmente embarazosa porque, como ya hemos señalado, la predicción teórica es siempre definida, mientras que lo inmediatamente dado se halla necesariamente rodeado por una bruma de incertidumbre. Para darles adecuada contestación se hace preciso exponer consideraciones ligeramente técnicas, que presentaremos en las secciones siguientes. La cuestión primera, por el contrario, puede atacarse inmediatamente.

Aunque tal vez parezca extraño al lógico, los científicos no son demasiado meticulosos en su demanda de que el número de ejemplos validadores sea suficiente: jamás han desarrollado un formalismo pretencioso para decidir cuándo pueden dejar de poner a prueba una teoría: a menudo, unas cuantas confirmaciones cruciales satisfacen su ansia de certeza, para consternación quizá de los empiristas empedernidos. A estas alturas, sin embargo, debería estar ya clara la razón de su modestia: tenemos que encontrarla en las relaciones sistemáticas que existen entre las construcciones interpretativas antes de ponerlas a prueba; pues el apoyo proporcionado por la coherencia lógica de sus concepciones exime al científico de la necesidad de una verificación exhaustiva. En cierto sentido, y muy importante, una teoría es algo más que la clase de oraciones que pueda engendrar, y el conocimiento de esta transcendencia inclina a los científicos a aceptar sin vacilación una teoría después de haberla sometido a un número de pruebas totalmente inadecuado estadísticamente: este nexo racional que todo lo penetra les permite también decidir qué experimentos son cruciales.

6.2. El significado de la concordancia entre teoría y observación

Al declarar que toda experiencia inmediata carece de certeza parece pecarse de exageración, ya que es verdad que algunos aspectos de la percepción alcanzan el más alto grado posible de certidumbre: si bien a mi experiencia de ver un *árbol* le puede afectar una duda infinitesimal, el acto de *ver* es, sin embargo, indudable. Pero, a medida que progresamos hacia grados más elevados de matización de lo dicho, se deslizan en nuestras declaraciones ciertos elementos de incertidumbre; así, "veo una rosa roja" es discutible en caso de que no pueda yo distinguir colores; "esta mesa tiene un metro de altura" es una afirmación de la que se sospechará su falta de exactitud, ya que todo físico sabe que no puede enunciar el valor de una constante física sin estimar el error de medida que tal valor admita. Por consiguiente, a medida que avanzamos hacia un mayor refinamiento de la percepción se hace también más evidente la incertidumbre (si bien suele hacerse cada vez más pequeña): por todas partes nos vemos enfrentados con incertidumbres intrínsecas al nivel de las inmediateces concretas. Hay que admitir, naturalmente, que al nivel del lenguaje es muchas veces posible eliminar artificialmente estas incertidumbres; pues si digo "esta mesa tiene *alrededor* de un metro

de altura" no puedo ser acusado de inexactitud, pero lo equivocidad subyacente de la experiencia no se altera por esta forma de enunciación.

Ahora bien: sucede que la ciencia, en sus estadios más avanzados, se interesa fundamentalmente por experiencias de un tipo sumamente específico que se denominan medidas: todas las medidas implican *números.* Mas no debe entenderse que esta generalización excluya del interés científico abundantes observaciones que no se manifiestan en números, de las cuales sería fácil citar ejemplos: supongamos, por ejemplo, que, según una teoría determinada, cierta sustancia deba emitir una línea espectral en una región dada del espectro, y que según otra teoría le está vedada esa línea; que ello se produzca o no es cuestión de suma importancia y se dirime plenamente sin apelar a número alguno. Igualmente puede ser de gran valor saber si dos líneas rectas trazadas en un papel se cortan o no, y tampoco los números tienen importancia para representar observaciones de este tipo: no son medidas en el sentido que nosotros damos a esta palabra, pero son, sin embargo, importantes.

Volviendo a las medidas propiamente dichas, observamos una gran variedad de maneras conforme a las cuales conducen a números. EDDINGTON creía que todas las medidas provienen de lecturas sobre una escala graduada de la posición de unas agujas indicadoras; pero forzaba con ello los hechos en aras de la uniformidad, ya que, por lo menos, existe una importante clase de medida que no puede ser reducida a la lectura de un indicador, y es el contar. Los que primero investigaron en el campo de la radiactividad obtuvieron abundante y útil información física mediante el tedioso proceso de contar los destellos producidos sobre una pantalla o de escuchar los chasquidos de un relé activado por un contador Geiger; y las observaciones sobre el crecimiento de un embrión o sobre la división de una célula pueden producir números, aunque no a través de la lectura de agujas indicadoras. Es preciso clasificar, como medidas en sentido amplio, todas estas actividades.

Se ha discutido mucho en torno a las clases de números que se encuentran en la percepción inmediata. Se arguye habitualmente que son números *reales,* dándose por supuesto que $\sqrt{-1}$ no se presenta en la experiencia inmediata. Pero tampoco ningún otro número: toda apelación al número implica ya un tránsito al campo *C,* tránsito tan obvio que pasa fácilmente inadvertido. Así, incluso el enunciado usual de los resultados de una observación constituye ya una paráfrasis (por más que inofensiva) de una experiencia inmediata. Comprendido esto, resulta claro que los números complejos no tienen por qué quedar excluidos de los informes de observaciones; en realidad, actualmente es corriente valerse de ellos; así, los ingenieros emplean teorías que atribuyen conductividades complejas a todas las sustancias: la parte real de la conductividad es una medida de la potencia eléctrica transmitida por la sustancia, y la parte imaginaria, una medida del cambio de fase que experimenta tal potencia; ambas son mensurables, de ordinario sobre escalas

graduadas en números reales, mas, para poder utilizarlos en las fórmulas, hay que multiplicar los números de una escala por $\sqrt{-1}$. Es, por consiguiente, más justo sostener que se puede utilizar todo el campo de los números complejos para expresar los resultados de las observaciones.

Existe también la distinción entre números racionales e irracionales; pertenecen a la primera clase los cocientes entre números enteros, y a la segunda, cantidades que, como $\sqrt{2}$, no pueden escribirse en forma de razón entre números enteros. Es de suponer que todo instrumento de medida tendrá un "valor mínimo", un intervalo mínimo de detección. La división menor del metro de carpintero es un milímetro, siendo dudoso que una persona que utilice un metro de este tipo pueda distinguir una fracción de él; y cualquiera que sea el valor mínimo para un operador que utilice un instrumento, la medida que obtenga con él ha de ser necesariamente un múltiplo de los valores mínimos en que se halla dividido dicho instrumento. Pues bien, si el valor mínimo es una fracción racional de la unidad de medida, el resultado es un número racional de unidades. Este es el razonamiento que ha convencido a algunos autores de la impropiedad de los números irracionales en la ciencia.

Sin embargo, tal razonamiento no es muy concluyente, pues supongamos que eligiéramos como unidad no una pulgada, sino π pulgadas; puesto que π es irracional (y trascendental), el valor obtenido con una regla de carpintero es ahora irracional (y trascendental). O supongamos también que quisiéramos medir el lado de un cuadrado y, a falta de regla, empleásemos un intégrafo (un aparato que mide áreas): si el resultado fuese 200 cm^2, la longitud medida sería irracional. Vemos, pues, lo peliagudo que resulta decidir entre estas dos clases de números.

Afortunadamente, la decisión es innecesaria, y completamente ilusorio el problema referente a las medidas, ya que la incertidumbre intrínseca de la percepción nos aligera de todas las dificultades. Siendo finita, esta incertidumbre rodea todo valor medido de una gama de otros valores posibles, y, puesto que los números racionales se entreveran con los irracionales en todo intervalo pequeño, la medida no permite discriminación alguna entre ellos. Tal vez esto no produzca gran satisfacción, ya que el matemático no puede por menos de experimentar cierto resentimiento contra una ciencia empírica que no le permite aplicar un concepto tan bello cual es la distinción entre números racionales e irracionales. La enseñanza para el filósofo, sin embargo, es sencilla: la distinción no ha procedido, ciertamente, de la percepción sensorial; la reflexión sobre este punto proporciona una acusación contra el empirismo puro y quizá una recomendación para la clase de epistemología de construcciones interpretativas que aquí presentamos.

Tenemos ahora que examinar más atentamente las incertidumbres de que nos estamos ocupando. Supongamos que medimos la longitud de una mesa. Si nos basta con un resultado aproximado podemos utilizar un metro de carpintero y afirmar que su longitud es de 1.559 milímetros, comprendiendo, sin embargo, que puede existir un error de cerca de

un milímetro. Un procedimiento más cuidadoso, que es el adoptado en la práctica científica, es realizar la medición con un instrumento más preciso, por ejemplo una regla provista de nonio graduado, y repetir también la medición cierto número de veces; así se llega a un conjunto de resultados, tales como 1.558,5 mm, 1.559,5 mm, 1.559,25 mm, 1.558,75 milímetros, etc.; ninguno de ellos es más digno de confianza que cualquier otro, y no existe medio alguno de averiguar cuál es "verdadero". Un mayor refinamiento daría lugar a otro conjunto de números más cercanos entre sí, pero también sin ninguna preferencia por ninguno de sus valores individuales. Esta equivocación de la percepción inmediata, completamente inalterable en principio, es lo que aquí nos interesa.

Esto nos obliga, en particular, a volver sobre la cuestión formulada en la sección anterior (¿cómo puede manejárselas una teoría deductiva con observaciones equívocas?), para estudiarla más seriamente.

6.3. Las medidas de precisión

En primer lugar, no olvidemos que un circuito de confirmación empírica (fig. 6.1) tiene *dos* terminales, no uno sólo; y de ahí que exista una bruma de incertidumbre en torno al punto P_1 y otra en torno al punto P_2. Ahora bien: ni las reglas de correlación ni los procedimientos deductivos en el campo C introducen por sí mismas incertidumbres: para que una teoría quede confirmada, debe propagarse y transformar la bruma que rodee a P_1 en una bruma predicha acerca de P_2, y la de este último punto debe superponerse de alguna manera a la predicha (o, en otro sentido, hallarse de acuerdo con ella). La idea de superposición tendría visos de atractiva y práctica con tal de que pudiera definirse numéricamente el *margen* de incertidumbre; pues de nada servirá, por ejemplo, decir que el entorno o margen de incertidumbre de P_2 se extiende desde el menor valor medido hasta el mayor, ya que si se hubiesen realizado más mediciones podrían haber aparecido números más pequeños y más grandes. La primera tarea a realizar consistirá, por consiguiente, en indicar cómo puede asignarse un error finito o una medida de precisión a un conjunto disperso de datos numéricos; cosa que nos llevará a adentrarnos un poco en la teoría de errores.

La palabra "error" posee ciertas resonancias de "falseamiento" o "alejamiento de la verdad" que son engañosas, en cuanto que sugieren un valor verdadero que la experiencia podría revelarnos; pero la observación no proporciona valor verdadero alguno, y lo que se toma como tal sobre la base de un determinado conjunto de mediciones está fijado por un acuerdo metodológico. Vemos cómo aquí, en la frontera misma de lo inmediatamente dado, es preciso apelar a recursos reguladores procedentes del campo C para estabilizar la situación epistemológica. Lo que realmente se hace es lo siguiente: se elige como valor verdadero de un conjunto de observaciones el *valor más probable*—más probable bajo

las condiciones que se pondrán de manifiesto más adelante—, que resulta ser la media aritmética; y una vez fijado el "valor verdadero", se le atribuye un margen de error; esto es, un intervalo (en torno a la media) cuyas dimensiones dan la medida de la falta de fiabilidad que posee el valor elegido. Desde luego, el experimentador habla muchas veces como si "existiese" un valor absolutamente verdadero del cual fuese la media la mejor aproximación; y tiende a decir que el error atribuido señala el intervalo dentro del cual juzga que debe de estar confinado el valor verdadero. Sin embargo, sería preferible considerar esto como una útil metáfora, pues, salvo en los casos en que el valor verdadero está fijado por definición (el peso atómico del oxígeno es 16,000, sin error), no disponemos de medio alguno para determinar exactamente valores verdaderos.

¿Por qué la media aritmética de una serie de observaciones constituye la mejor elección como valor verdadero y cómo se determina el margen del error? En líneas generales, el razonamiento es el siguiente. En un valor medido existen dos clases de desviaciones de la fidelidad: los llamados errores determinados, o *sistemáticos,* y los llamados errores *aleatorios.* Se supone que los primeros provienen de equivocaciones cometidas por el observador, al leer una escala o al tomar nota de los datos, o de instrumentos defectuosos o mal ajustados; son generalmente grandes, detectables y evitables, y, por consiguiente, se admite que se los habrá eliminado en toda serie de observaciones de buena calidad. Los errores aleatorios, por el contrario, son indeterminados (esto es, obedecen a numerosas causas desconocidas) e inevitables; se supone, además, que dan lugar a cierta distribución de valores medidos en torno a su media, la llamada distribución "normal", o *gaussiana,* que puede describirse del modo que sigue:

Si x es el resultado de una medición, el número dN de mediciones que proporcionen valores comprendidos entre x y $x+dx$ será, según la distribución normal,

$$dN = \mathrm{C^{te}}\, e^{-k^2(x-x_0)^2}\, dx \tag{6.1}$$

siendo k y x_0 constantes desconocidas y, por tanto, ajustables [5].

En la sección siguiente expondremos las razones que autorizan a suponer la validez de esta ley; pero, una vez admitida, salta a la vista el siguiente procedimiento para el tratamiento de los datos:

Primero se representan gráficamente los resultados medidos, para lo cual consideraremos como ordenadas el número de mediciones—llamado dN en la ecuación (6.1)—que haya sido necesario para obtener cada valor de x; valores estos últimos que se llevarán sobre el eje de abscisas.

---

[5] No podemos saber cuál será el valor numérico de la "C^te" de esta ecuación porque la suma (o integral) de todas las dN tiene que ser igual al número total de mediciones.

La serie de puntos así obtenida ofrecerá aproximadamente el aspecto de una campana, correspondiendo, pues, más o menos, a la representación gráfica de la ecuación (6.1); y luego trazaremos la mejor curva gaussiana que pase por entre los puntos obtenidos y deduciremos de ella x_0 y k. Ahora bien, existe siempre cierta incertidumbre en la elección de x_0, que es valor medido "más popular", en el sentido de que en sus proximidades se encuentra el mayor número de mediciones; pero esta incertidumbre puede eliminarse mediante un teorema demostrable a partir de la ecuación (6.1) como premisa (teorema que dice: si un grupo de valores medidos tiene una distribución normal, la x_0 más probable es su media aritmética). Nos serviremos, pues, de este teorema para determinar x_0, y pasaremos luego a hallar k efectuando un ajuste de la curva; luego decimos arbitrariamente que la primera de estas cantidades, x_0, es el "valor verdadero", mientras que k recibe el nombre de *medida de la precisión* alcanzada.

Cuanto mayor sea el valor de k, más angosto será el gráfico de la distribución normal y más pequeño el número de observaciones que se alejen considerablemente de x_0; y de ahí el nombre de aquel parámetro. El recíproco de k tiene la misma dimensión física que x, y representa una desviación o alejamiento de x_0, llamada error. Parecería natural que tomásemos $1/k$ como medida del error de un grupo dado de observaciones; pero ciertas consideraciones apoyadas en el cálculo de probabilidades indican, sin embargo, que ello constituiría una estimación indebidamente pesimista y que conviene elegir una medida más halagüeña. En consecuencia, los científicos se han acostumbrado a utilizar uno de los tres siguientes tipos de error, o medidas de incertidumbre, cada uno de los cuales posee un significado estadístico específico:

Error probable: $$r=\frac{0{,}477}{k}$$

Error medio geométrico: $$m=\frac{0{,}701}{k}$$

Error promedio: $$a=\frac{0{,}564}{k}$$

El error probable r es una desviación de la media en una distribución normal elegida de modo que la mitad de los errores de todas las observaciones hechas sea mayor que r, y la otra mitad, menor que él. El error medio es la media aritmética de todos los errores, cualquiera que sea su signo, mientras que el error medio geométrico, también llamado desviación *standard* o típica, está definido como valor medio de la raíz cuadrada de los cuadrados de todos los errores.

No existe acuerdo entre los científicos respecto de cuál de los tres constituye la medida más adecuada de la incertidumbre de las observa-

ciones, y no puede haberlo, en realidad, si se tiene en cuenta el significado arbitrario de las medidas; prácticamente, sin embargo, las diferencias son muy poco importantes, tan poco importantes que los científicos no han sentido la necesidad de reunirse para una común declaración de fe en favor de una u otra elección. Pero el filósofo de la ciencia se halla obligado a tomar nota de este notable hecho: es preciso extraer tanto la "verdad" como la "tolerancia" de entre las incertidumbres de lo inmediatamente dado por medio de reglas más o menos arbitrarias que no se nos presentan inmediatamente en la Naturaleza.

Esta tolerancia, o error, *hace posible* una comparación entre la predicción teórica y la observación que sería peor que problemática si las predicciones "puntuales" tuvieran que corresponder exactamente a los datos presentados en forma puntual; y de este modo se puede llegar en la práctica a una decisión sobre si se verifica o no una teoría dada. Por ejemplo, el punto P_1 de la figura 6.1, en el que comienza el circuito predictivo se halla rodeado de un margen de error; y para llevar a cabo la confirmación correspondiente pueden utilizarse dos métodos: uno desprecia el error en P_1 e inserta en la teoría el valor "verdadero" de la medición, con lo que obtiene un P_2 exacto; entonces, se obtiene la confirmación si el valor exacto predicho está incluido dentro de la tolerancia de observaciones sobre P_2 (los científicos precavidos eligen, con objeto de estar más seguros, el error probable como tolerancia); el segundo método consiste en tomar en cuenta la tolerancia en P_1 y dejar que la teoría prediga un valor verdadero y una tolerancia en P_2; y se considera que la teoría queda verificada si la tolerancia predicha y la observada poseen un intervalo común.

6.4. La curva normal de errores

Como hemos visto, la aceptación de la curva normal, tal y como está dada por la ecuación (6.1), es decisiva en el tratamiento de las observaciones que hemos expuesto, y para lograr una comprensión crítica es indispensable presentar claramente las razones que tengamos en su respaldo. No es infrecuente encontrar hombres de ciencia que justifiquen su uso de la ley normal apelando a la experiencia directa, diciendo que un número suficientemente grande de observaciones se han ajustado a tal ley y han demostrado, por tanto, su verdad, de suerte que está sustanciada empíricamente. Pero es clara la debilidad de este razonamiento (no simplemente su circularidad, sino, de manera más destacada, la falsedad de sus premisas); pues la experiencia presenta al científico innumerables distribuciones *sesgadas,* que difieren apreciablemente de la ley normal; y muchas veces las desprecia o las corrige, porque, por alguna razón hasta ahora no formulada, se opone a ellas: utiliza la distribución normal como una generalización inductiva de la experiencia y, a la vez, como criterio del crédito que merece esa experiencia; es decir,

se quiere alzar en vilo tirándose de los propios cabellos, a menos que un razonamiento independiente pueda explicar la normalidad de esa distribución.

Esto último puede lograrse por medio de la teoría de la probabilidad, cálculo cuya aplicabilidad a las observaciones daremos aquí por sentada; y, a su vez, es necesario admitir esto para romper el círculo vicioso que se produce siempre que el tratamiento de las observaciones se justifique por una referencia exclusiva a ellas mismas. Lo que ahora dejamos en la oscuridad será objeto de más detenido y cuidadoso examen en el capítulo XIII; pues al efecto que ahora nos interesa basta con suponer que esa probabilidad, que es una *construcción interpretativa* como muchas otras y está definida por métodos matemáticos rigurosos, se relaciona con los datos empíricos a través de unas reglas de correspondencia. El no comprender este sencillo hecho puede fácilmente transformar la probabilidad en un montón de incoherencias.

La distribución normal puede demostrarse sobre la base de tres hipótesis:

1. Existe un gran número de agentes, o "causas", que producen desviaciones aleatorias.
2. Cada agente produce una distribución probabilística de desviaciones que tiene a la vez una media finita y una dispersión finita[6].
3. La desviación total resultante de la acción simultánea de todos los agentes es la suma algebraica de todas las desviaciones individuales.

Bajo estas condiciones, la probabilidad de una desviación total x resulta estar dada por la ecuación (6.1). Si suponemos además que el número de observaciones que producen el valor x es igual al número total de observaciones multiplicado por la probabilidad correspondiente, habremos asentado la distribución normal de errores. Los detalles de esta deducción tal vez carezcan de interés para el filósofo, pero el hecho de su posibilidad y sus premisas revisten una importancia extraordinaria: a través de ellos resulta evidente que el científico actúa sensatamente cuando utiliza medidas de la precisión, cuando atribuye error a sus observaciones y cuando discrimina entre datos dignos y no dignos de confianza; aquí se hallan las raíces racionales que proporcionan una base estable a sus métodos y una justificación para su uso de las normas.

Naturalmente, el estudio llevado a cabo en esta sección y en la precedente está lejos de ser completo: se dan casos en los que existen buenas razones para que el investigador no aplique la ecuación *(6.1)*, sino alguna otra distribución, que sería normal bajo otras condiciones. También se plantean cuestiones en torno a la probabilidad de que un determinado valor verdadero o una determinada medida de la precisión sean adecuados, cuestiones del tipo de qué probabilidad hay de que cien observaciones produzcan una media aritmética que difiera en menos

[6] Para una definición exacta de estos términos y una demostración del teorema, véase LINDSAY y MARGENAU: *Foundations of Physics*, John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1936.

de una cantidad dada de la media resultante de diez observaciones. Finalmente, existen numerosas pruebas prácticas por las que puede determinarse el significado de los datos, así como atajos que abrevian largos y tediosos cálculos. La estadística de las observaciones forma un campo muy vasto y extraordinariamente complejo; aquí nos hemos limitado a presentar un esbozo de su estructura filosófica fundamental.

6.5. ¿Pueden reducirse indefinidamente los errores de observación?

Se dice a veces que la descripción teórica es siempre *aproximada*, nunca completamente verdadera; y, de conformidad con esta idea, corresponde a la teoría esforzarse constantemente hasta encontrar el veredicto de la experiencia. Son muchos los que se dejan captar por la seductora franqueza de esta postura metafísica, que tan claramente reconoce la diferencia entre los resultados predichos y los hechos medidos de la ciencia, y que quiere enfrentarse tan llanamente con lo que sucede; pero examinémosla de nuevo: la diferencia que reconoce existe, ciertamente, y esa diferencia llega en el plano fáctico a un desacuerdo continuo; mas al tratar de este desacuerdo, la interpretación en cuestión recurre al eufemismo de una *aproximación* por medio de teorías.

Pero, ¿a qué se aproximan las predicciones teóricas?

La concepción citada involucra una mala inteligencia del proceso de observación: da por sentada la santidad de una única medida, la llama realidad, y desafía luego a la teoría a que la denomine; y supone que ésta se esfuerza penosamente por adivinar la verdad, acercándose cada vez más, sin llegar nunca a alcanzarla plenamente. Desgraciadamente, esta ingenua interpretación deja de resolver las incertidumbres siempre presentes en la percepción inmediata (en realidad, las pasa por alto): deja de lado el importantísimo papel que desempeña la estadística para ordenar y regularizar la experiencia.

La teoría se corrige a sí misma, desde luego, cuando se enfrenta con un hecho empírico que caiga fuera del límite de error admisible (admisible teniendo en cuenta las circunstancias); pero raras veces lo hace mediante aproximaciones sucesivas: busca nuevas ideas, trata de recordar efectos que no había incluido y vuelve a predecir, sin estar nunca segura de que la nueva predicción haya de encontrarse próxima a la antigua, aunque a menudo lo está, efectivamente. Resulta difícil decir, en la mayoría de los casos, si existe una *convergencia* de las predicciones teóricas. En general, por lo tanto, las teorías no se aproximan a los datos, ni convergen tampoco sobre ellos[7].

[7] Frecuentemente nos encontramos con teorías que pretenden no ser más que aproximaciones a teorías válidas y, por consiguiente, también a hechos de observación; y estas situaciones surgen cuando una teoría exacta, aun siendo idealmente posible de obtener, es demasiado complicada para ser objeto de consideración o demasiado alambicada para usos prácticos. Pero no nos ocupa-

Queda otra cosa por investigar en la convergencia de las observaciones. Para que se vea claramente de qué se trata, volvamos a nuestro primer ejemplo, la longitud de una mesa. Supongamos que cuatro mediciones sucesivas, realizadas con un instrumento de considerable precisión, dan los valores 1.558,5 mm, 1.559,5 mm, 1.559,25 mm y 1.558,75 mm, y que proponemos como "verdadero" valor su media, 1559,00 milímetros. Existen dos maneras de mejorar este resultado:

1) realizando más observaciones con el mismo instrumento;
2) utilizando unos instrumentos de medida más perfeccionados.

El primer método nos proporciona una serie de datos mayor; todos ellos, sin embargo, deben caer sobre la misma curva normal, de modo que, aunque nos facultan para trazar esta curva con mayor exactitud, no la sustituyen por otra dotada de un mayor grado de precisión. La ventaja obtenida radica en nuestra capacidad de establecer con mayor exactitud el máximo de la distribución normal; y, en consecuencia, podemos tener mayor confianza en el juicio de que la media del conjunto de datos es la mejor medida que se puede obtener de la longitud buscada, pero el error probable no experimenta cambio alguno.

Este estado de cosas puede presentarse de modo más formalizado de la siguiente manera: si llamamos a las medidas individuales $l_1, l_2, l_3 \ldots$, la media de n mediciones, que es $1/n\sum_{i}^{n} l_i = \bar{l}_n$, variará con n a medida y en el mismo grado en que aumente n. Podría esperarse que existiera el límite de $\bar{l}_n$ al tender n a infinito; por desgracia, sin embargo, no es éste el caso en el sencillo sentido en que se utiliza el término *límite* en la teoría ordinaria de funciones: en efecto, el valor de $\bar{l}_n$ puede fluctuar con amplitud finita incluso en una serie infinita de observaciones. Por esta razón los estadísticos han inventado un tipo más alambicado de límite, llamado *límite estocástico* (cuyo significado exacto no se halla libre de dificultosas consecuencias matemáticas); este límite es un valor hacia el que tiende a converger $\bar{l}_n$, de tal modo que la *probabilidad* de una gran desviación con respecto a ese valor se haga despreciable para n infinita. Si aceptamos esta definición, el primer método nos proporciona una estimación de la longitud de la mesa que puede ser distinta de 1.559,00 mm y tiene muchas probabilidades de ser satisfactoria, pero en ella no se ha reducido el error probable intrínseco de nuestras mediciones (llamaremos convergencia *interna* de un conjunto de observaciones a la convergencia, que acabamos de describir, hacia un valor medio cada vez más exacto).

El segundo método permite una reducción de los errores *intrínsecos*, e involucra la utilización de instrumentos de medida más precisos, tales como un microscopio o un interferómetro (no pretendemos insinuar que

---

remos aquí de estos casos, pues las teorías aproximadas se aproximan a las teorías exactas, y solamente podrán ser reconocidas como aproximadas cuando se disponga de reglas con las que pudiera construirse una teoría exacta.

la mesa sea un objeto en el que valga la pena de emeplear técnicas tan perfeccionadas, pero sirve como ejemplo). El primero de dichos instrumentos nos daría una serie de valores menos espaciados, como 1.558,71 milímetros, 1.558,83 mm, etc., y la curva normal a que podrían ajustarse sería más cerrada y poseería un mayor grado de precisión; un número suficiente de mediciones definirá, pues, una media que estará dentro o fuera de los límites del error probable definido por el conjunto más tosco de medidas: si cae fuera, uno de los conjuntos debe ser descartado, basándose en el supuesto de que se hallaba afectado por errores sistemáticos; en otro caso, se consideran compatibles ambos grupos, y se adopta el último como más significativo. El mismo procedimiento se lleva a cabo, por fin, con ayuda de un interferómetro; vamos a suponer que se haya obtenido así una tercera media, y llamemos a los sucesivos valores medios $\bar{l}$, $\bar{l}'$ y $\bar{l}''$, así como r, r' y r'' a los errores probables correspondientes. Se dirá que existe convergencia *externa* si los límites de error del grupo más selecto de mediciones caen dentro del margen de error del grupo más tosco; esto es, si

$$l_1 + r_1 \geqslant l_2 - r_2, \quad l_1 - r_1 \leqslant l_2 + r_2,$$
$$l_2 + r_2 \geqslant l_3 - r_3, \quad l_2 - r_2 \leqslant l_3 + r_3, \text{ etc.}$$

Hasta ahora no se ha llevado a cabo ningún estudio matemático de la convergencia externa, ni es probable que diera resultado, debido a que depende de que se disponga de instrumentos de medida de precisión, cosa que en cada caso ocurrirá o no. Por consiguiente, no puede darse una respuesta sencilla a la cuestión de si se acabará por encontrar una convergencia externa, y se hace preciso esperar a que se consigan nuevos progresos en las técnicas científicas. En la práctica, sin embargo, el científico se conforma con una secuencia limitada de observaciones externamente convergentes y tomándola como referencia es como se declaran correctas o incorrectas sus teorías. Hasta hace poco tiempo no se había puesto en tela de juicio su creencia en que, al fin y a la postre, todas las observaciones científicas poseen una convergencia externa, pues se pensaba que podía reducirse indefinidamente el margen de error en las mediciones físicas eligiendo instrumentos de medida cada vez más delicados.

Un físico que escribiese hace treinta años podría haber terminado en este punto la exposición de los caprichos de la observación, pues carecía de razones para sospechar que fuese incompleta; y hemos elegido el ejemplo expuesto de modo que se conformase a las expectativas de la física clásica. Mas actualmente sabemos de ciertas situaciones en que hay que modificar lo dicho.

Medir la longitud de una mesa es determinar la posición de uno de sus extremos en relación con el otro. Imaginemos una tarea del mismo tipo, pero a una escala de mucha mayor finura: la determinación de la posición de un átomo en la mesa; al proponerla no estamos diciendo

ninguna tontería, en absoluto, ya que el átomo es también una construcción interpretativa como la mesa, relacionada con la percepción inmediata por unas reglas de correspondencia (las cuales, si bien más complejas que las correspondientes a aquélla, no son menos seguras). Existen, de hecho, procedimientos perfectamente establecidos para determinar la posición de un átomo; y simplificaremos el estudio que nos proponemos hacer si consideramos un objeto de estructura más regular que una mesa de madera, por lo cual vamos a dirigir la atención sobre un cristal, como la sal gema o cualquier metal. Los rayos X y los haces de electrones pueden revelarnos la posición de un átomo en relación a otro de una manera que los físicos conocen sobradamente y que no es preciso detallar aquí; finalmente, para concentrarnos en el aspecto más sencillo de esta tarea, es preferible realizar las mediciones a temperaturas muy bajas, con el fin de que el movimiento[8] de los átomos no complique el problema. Una vez interpretadas y registradas las medidas, se ve que se dispersan del modo habitual en torno a una media, y que su distribución está representada por una curva normal. El grado de precisión dependerá de la longitud de onda de los rayos X o de los electrones empleados y también de la calidad de los instrumentos registradores; en cuanto a la convergencia de los resultados, será *interna.*

Al repetir las operaciones con señales de menor longitud de onda, con la esperanza de aumentar la precisión, se ven frustradas nuestras expectativas, ya que no es posible reducir la precisión por debajo de un mínimo, que, al parecer, está fijado en la naturaleza de las cosas. Y tampoco es éste un acontecimiento casual, debido a la imperfección de los instrumentos utilizados; pues suponer que pudiera ocurrir de otra manera contradiría las leyes conocidas de la naturaleza. Vemos que falla la convergencia *externa;* y además el error irreducible puede ser grande.

En el terreno de la física, esta situación se reconoció por vez primera cuando HEISENBERG descubrió el principio de incertidumbre, que es una expresión sucinta y formalizada, pero especial, de ella. En otras ciencias distintas de las matemáticas se había advertido vagamente una situación parecida, y se la había interpretado diciendo que las mediciones precisas eran imposibles. El psicólogo ha comprobado desde hace tiempo la interdependencia entre la respuesta del individuo a un estímulo dado y su conocimiento previo del procedimiento experimental empleado; y de hecho, en todas las ciencias biológicas las mediciones se hallan fuertemente influidas por la medición. La conocida paradoja de la predicción económica, ejemplificada en la circunstancia de que si fuese posible

---

[8] El físico tal vez presente la objeción de que no podemos eliminar el "movimiento" en el punto cero. Esto refleja un malentendido derivado de una utilización poco cuidadosa de las palabras: un átomo posee cierta *energía* en el punto cero y, por consiguiente, cierta incertidumbre en cuanto a posición; pero es injustificado atribuir esta incertidumbre al movimiento y, además, ello contradiría el demostrado hecho mecánico-cuantista de que el átomo no posee velocidad media. Resolveremos esta aparente paradoja, si de una paradoja se trata, en el capítulo XVIII.

predecir con exactitud el alza de los precios del mercado el aluvión de compras los haría ciertamente caer, constituye otro caso que ilustra la cuestión; todos estos fenómenos, juntamente con el tipo de mediciones físicas que acabamos de describir, se reducen en último término a una simple confirmación de un hecho básico: las observaciones individuales pueden manifestar una inevitable dispersión en torno a su valor medio, de suerte que no quepa garantizar su convergencia externa.

Volvemos ahora brevemente a nuestro átomo con su distribución normal de mediciones de posición. Si hubiéramos determinado ésta a una temperatura más elevada, los resultados observados no habrían caído sobre una curva tan sencilla: en casos de este tipo la distribución normal pierde su significado central, y da paso a una infinita variedad de otras distribuciones predecibles. Este hecho, sin embargo, aunque merecedor, en nuestra opinión, de que se lo tenga en cuenta, no altera los resultados fundamentales obtenidos. El físico, en su búsqueda de explicaciones conocidas, atribuye frecuentemente la falta de convergencia externa en su ciencia a una inevitable interacción entre el sistema cuyas propiedades mide y el aparato de medida; en el capítulo XVIII estudiaremos y evaluaremos estos intentos de atenuar el desconcierto originado por el descubrimiento de "ambigüedades" en la Naturaleza.

A muchos efectos, es útil distinguir entre las magnitudes que, como la longitud de un objeto físico ordinario, muestran un alto grado de convergencia externa en la medición, y otras que, como la posición de un átomo o un electrón, no participan de esa cualidad. Más adelante pondremos de manifiesto que las magnitudes de la primera clase conducen a una descripción causal cuando se las utiliza para definir los estados de los sistemas físicos; en cambio, si los estados se definen a base de las magnitudes de la segunda clase no se puede lograr una descripción causal.

Hemos hablado en las últimas secciones de mediciones como si su lugar se hallase exclusivamente en la Naturaleza y como si el tránsito hasta la teoría constituyese un limpio vuelo sobre la tierra de nadie. No puede por menos de haberse hecho evidente al lector la artificiosidad de esta simplificación, por lo que le debemos una disculpa y una corrección; pues ha de recordarse que el término de *medición,* en sí mismo, no describe un proceso limitado a las experiencias en el campo *P,* sino un tránsito completo desde *P* hasta *C* a través de unas reglas. Todas las incertidumbres, sin embargo, quedan limitadas a *P.*

Y, finalmente, quizá para confundir un tanto todo el problema, recordemos un extremo que ya ha sido puesto de relieve (en el capítulo III). El límite entre el campo *P* y el campo *C* no está nítidamente trazado: puede señalarse con variaciones arbitrarias; pues, después de todo, tanto *P* como *C* forman parte de una experiencia continua, y el filósofo debe aprender a distinguir entre lo racional y lo sensible del mismo modo que el químico ve la nebulosa (aunque significativa) diferencia entre el mundo orgánico y el inorgánico.

RESUMEN

Las teorías que poseen la racionalidad y la coherencia exigidas por los requisitos metafísicos del capítulo V alcanzan validez a través de la confirmación empírica. Este proceso representa un circuito, que se puede seguir en cualquier sentido, desde la percepción (observación) hasta las construcciones interpretativas, a través de las reglas de correspondencia, y vuelta de nuevo a lo largo de alguna otra ruta hasta la percepción. Al examinar los detalles de tales circuitos de confirmación surgen varias importantes preguntas: ¿en cuántos casos debe verificarse una teoría para que se la pueda aceptar como válida?; ¿qué se entiende por acuerdo entre expectativa teórica y observación? Esta última cuestión, aunque un tanto turbadora y difícil de resolver debido a la ya apuntada incertidumbre intrínseca de la percepción, exige un detenido examen de los medios estadísticos empleados en la ciencia con el fin de pulir los datos, investigación que llevamos a cabo en las secciones 6.2 a 6.4.

Al tratar de reducir la incertidumbre de los datos es preciso mantener dos puntos de vista diferentes. El valor "verdadero" de una cantidad física puede ser obtenido con creciente precisión a medida que se vayan haciendo más y más observaciones: la *media* de la serie de resultados medidos se aproxima al valor *verdadero;* fenómeno al que denominamos *convergencia interna* de un conjunto de medidas. El otro punto de vista es el siguiente: cuando se dispone de varios conjuntos de medidas, obtenidos con diferentes instrumentos de medida, sus valores medios no se hallarán en general de acuerdo, ni habrán de coincidir necesariamente en ningún punto sus márgenes de error probable. El progresivo acuerdo entre tales conjuntos a medida que aumenta la perfección de los instrumentos de medida recibe aquí el nombre de *convergencia externa,* y hacemos un intento de definirlo.

La convergencia interna es un fenómeno de carácter más bien general; en cuanto a la externa, falta en determinadas partes de la física, por ejemplo, en la mecánica cuántica. Puede, además, ponerse de manifiesto que cabe clasificar a menudo las cantidades físicas (observables) viendo si sus medidas muestran o no una convergencia externa. (Volveremos sobre este punto en el capítulo VIII.)

BIBLIOGRAFIA

CARNAP, R.: "Testability and Meaning", *Phil. Sci.*, 3:419 (1936), 4:1 (1937).
CZUBER, E.: *Theorie der Beobachtungsfehler,* B. G. Teubner, Leipzig, (1891).
HEMPEL, C. G., y P. OPPENHEIM: *Phil. Sci.*, 15:135 (1948).
LINDSAY, R. B., y H. MARGENEAU: *Foundations of Physics,* John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1936.
PLUMMER, H. C.: *Probability and Frequency,* Macmillan & Co., Ltd., Londres, 1940.

SHEWHART, W .A., y W. E. DEMING: *Statistical Method,* Ministerio de Agricultura de los EE. UU., Washington, D. C., 1939.
SWANN, W. F. G.: *The Architecture of the Universe,* The Macmillan Company, Nueva York, 1934.
WALD, A.: *Sequential Analysis,* John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1947.
WORTHING, A. G., y J. GEFFNER: *Treatment of Experimental Data,* John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1943.

CAPITULO VII

EL ESPACIO Y EL TIEMPO

7.1. Espacio, tiempo y realidad

El espacio y el tiempo son temas sumamente poéticos. Como objetos del pensamiento humano han penetrado en la historia de las ideas revestidos de un esplendor casi divino y ornados de todos los simbólicos y hermosos paramentos con que las culturas primitivas solían rodear a sus ídolos. La temerosa veneración del espacio y el tiempo ha sido continua (y continuamente observada), con el efecto consiguiente de que ni siquiera el pensamiento moderno puede liberarse por completo de su mística sumisión al pasado: las alas de Mercurio nos han dejado un persistente recuerdo de la ubicua presencia de algo misterioso que ha de ser atravesado, y las dos barbadas caras de Jano han marcado indeleblemente su impronta sobre nuestras ideas del tiempo. La tarea del filósofo de la ciencia no deja, por consiguiente, de ser un tanto ingrata, ya que debe hacer caso omiso de la mitología, resistir los impulsos poéticos y llevar a cabo deliberadamente una fría disección del contenido fáctico y lógico de los términos *espacio* y *tiempo*. Tal es la prosaica faena en que ahora nos vamos a embarcar.

El filósofo, en efecto, debe hacer algo más que protegerse contra la tradición: tiene que renunciar a la cómoda tendencia que tan a menudo lleva al pensamiento más allá de su propio destino. Al reflexionar sobre el espacio, la mente se abre a sí misma al instante a los misteriosos aspectos de un inexplorado universo astronómico, a la contemplación de lo infinito, de lo totalmente desocupado; lo conocido se mezcla con lo desconocido, y es más probable que la investigación desemboque en una inspiración moral o estética que en un conocimiento articulado. El espacio posee esta cualidad de deslizar engrasadas ruedecillas bajo nuestra imaginación porque sus propiedades conocidas son fáciles de comprender y de generalizar, mientras que, en cambio, se sabe muy poco acerca de sus cualidades en grande.

Lo mismo que con el tiempo ocurre con el espacio. La memoria al volver sobre el pasado y perderse en los gratos y desdibujados acontecimientos de nuestra niñez, retorna ansiosamente al presente y contempla el futuro como imaginación. No encuentra aquí ningún obstáculo ni ningún fin: puede adherirse a una visión familiar, tal como la de una carretera recta, carente de árboles y de señales, que se despliegue inde-

finidamente hacia delante en un paisaje llano, exento de objetos identificadores; avanza a lo largo de esta carretera, avanza hasta que el tedio del movimiento se funde con el hechizo de la eternidad en una irresistible frustración. ¡El tiempo, el insondable, infinito tiempo, ha sido experimentado! No había objetos en la carretera, y ésta, en realidad, no existía; de ahí la conclusión de que el tiempo es independiente de los objetos, de que va desarrollándose perennemente por sí mismo.

Así se han producido los desposorios del tiempo con la *Realidad.* Desgraciadamente, la unión, aunque sancionada por los poetas, debe ser deciarada ilegítima por muy buenas razones. La menos importante de ellas es la circunstancia de que el epistemólogo no pronuncie la bendición: más pertinente es, acaso, la razón de que la Realidad tiene en total muchos cónyuges; y la más perjudicial está constituida por el hecho de que esta dama carece de partida de nacimiento. De la facilidad con que el hombre está dispuesto a admitir la Realidad en el palenque de la controversia filosófica sin examinar sus credenciales, en este ejemplo como en muchos otros, han provenido unas confusiones incalculables; pues se comporta como un tosco rufián que desprecia toda argumentación y recurre a cualquier clase de táctica, sea honrosa o no.

Ahora bien: nosotros no queremos reducir al ostracismo a tal sujeto, pero deseamos conocer su origen, el medio ambiente en que se haya desenvuelto y la confianza que pueda inspirar. Con tal fin disolveremos provisionalmente semejante matrimonio hasta que, hacia el final del libro, nos hallemos más familiarizados con la presunta desposada; entonces encontraremos motivos para reinstaurar la unión bajo circunstancias menos románticas; mas, por el momento, será mejor que veamos lo que puede hacerse con el espacio y el tiempo en sus respectivos estados vírgenes.

Las ficciones que los rodean quedan eliminadas si tratamos de desvelar una cardinal falacia que ha persistido a través de la historia del pensamiento, y que es la siguiente: "Podemos imaginar las cosas como desaparecidas, pero no el espacio que ocupan y el tiempo en que están presentes; por lo tanto, el espacio y el tiempo son independientes de las cosas y piden tener un *status* propio." Se suele afirmar que dicho *status* es de existencia o realidad independiente, con lo que volvemos a los desposorios contra los que hemos opuesto ya una objeción. Pero con la misma facilidad puede imprimirse al argumento un giro más espectacular y conducir, en su versión parmenídea, a una impresionante representación del universo físico: una omnipenetrante y eterna esfera reposando en quietud absoluta. O puede dar lugar a controversias como las suscitadas entre DESCARTES y HENRY MORE [1], que debatieron el tema del espacio como extensión divina: DESCARTES, incapaz de imaginar el espacio vacío, sostenía que un vaso cuyo interior careciera por completo de materia

[1] Véase MORE: *Oeuvres,* vol. 10, pág. 184, o BURTT: *Metaphysical Foundations of Modern Physical Science,* Nueva York, Harcourt, Brace and Company, Inc. 1925.

se derrumbaría; MORE, sin embargo, pensaba que la extensión divina podría muy bien deslizarse en su interior y mantener las paredes incólumes. Traemos aquí estos argumentos no como ejemplos de divertidas aberraciones que hayamos de recordar con una sonrisa de superioridad, sino como honestas y realmente inevitables consecuencias de la aceptación del razonamiento expresado más arriba. ¿Qué es, pues, lo que entendemos por "imaginar las cosas como desaparecidas" y en qué sentido subsiste el espacio?

En primer lugar, tratemos de enunciar este raciocinio en sus formas más sugestivas; cosa que cabe lograr mediante tres argumentos diferentes, a los que podríamos denominar con los nombres expresados en la sección siguiente.

7.2. LA INDEPENDENCIA DEL ESPACIO RESPECTO DE LOS OBJETOS

a) I. *Argumento cinestésico.* Es un hecho de la experiencia común que los cuerpos obstruyen el movimiento; dan así origen a características sensaciones táctiles en sus superficies, mientras que excluyen ciertas sensaciones cinestésicas a las que normalmente estamos acostumbrados; pero estas últimas experiencias se hacen posibles cuando se cambia el cuerpo de sitio: uno puede mover la mano en aquella región del espacio que anteriormente se hallara ocupada. Ahora bien, el *cuerpo* debe su individualidad a su carácter de ser un foco de posibles experiencias táctiles, numerosas y diversificadas; desaparecido el cuerpo, queda todavía un foco de posibles experiencias, si bien pertenecen uniformemente a la especie cinestésica. Si aquello nos permitía hablar de un cuerpo individual dotado de numerosas propiedades, esto exige la introducción de un agente uniforme, un portador de posibles experiencias cinestésicas, que se denomina espacio.

II. *Argumento de las propiedades.* Ocupar espacio es una propiedad de todos los cuerpos, como lo son su color, su dureza, su olor y su composición. Es sumamente digno de hacerse notar que cuando alejamos un cuerpo, ya sea de hecho o con la imaginación, se lleva consigo todas sus propiedades menos una: solamente el espacio que ocupaba queda atrás. Resulta, pues, evidente que este espacio no es verdaderamente atribuible al cuerpo, sino que posee una entidad propia, de la cual, simplemente, participa el cuerpo: si se hallara unida a los cuerpos no podría quedar atrás.

III. *Argumento de la localizabilidad.* La experiencia de los cuerpos contiene la cualidad "ahí". Pero el significado de esta designación local es notoriamente esquivo, y, para aclarar y concretar sus perfiles existe el método operacional, que discurre del modo siguiente: a la vista del árbol que hay delante de mi casa, puedo avanzar hacia él y determinar su emplazamiento contando los pasos que lo separen de la puerta principal, o mediante operaciones más complicadas. Esto define

el significado de la posición del árbol. Pero, una vez cortado el árbol, puedo todavía avanzar hasta su primitivo emplazamiento merced a la misma serie de pasos: el árbol ha desaparecido, pero su posición continúa presente. Si todos los conceptos quedan definidos a base de operaciones, es preciso reservar un concepto especial para la posición o emplazamiento del árbol, ya que, evidentemente, esa posición puede ser obtenida una vez eliminado el árbol. En realidad, la presencia original de un objeto es totalmente irrelevante en este procedimiento: uno puede ir a cualquier parte, detenerse en cualquier punto y demostrar así la tesis de que debe haber algo; y ese algo es el espacio.

b) I. Refutemos ahora estos argumentos. Es evidentemente contrario a los preceptos que consideramos adecuados definir un cuerpo como sede de posibles experiencias, y esta objeción bastaría para despojar de significado al argumento cinestésico. Pero es mejor enfrentarse con tal argumento en su propio terreno; y ahí es donde se derrumba, porque no dice nada que sea peculiar del espacio (o del tiempo). Desde luego, cuando se imagina desaparecido un cuerpo existe la posibilidad de otras sensaciones: cuando se imagina desaparecido un color existe la posibilidad, es más, la necesidad de imaginar otro; pero, dado esto, ¿por qué no ocupa el color el mismo *status* universal que el espacio? Pues tras cada sensación inmediata subsiste la posibilidad de otra. El argumento cinestésico hincha un ejemplo concreto de esta posibilidad hasta hacerle alcanzar desmesuradas proporciones, dejando de considerar todas las demás; y manifiesta, además, una acusada tendencia a convertir lo potencial en actual de un modo que ha sido objeto de frecuentes críticas en relación con el realismo medieval.

II. El argumento de las propiedades cae por su base si logra demostrarse que el espacio no es una *propiedad de algo;* mas ésta es, de hecho, una clara consecuencia de la física moderna: aun en sus ramas más sencillas, tales como la mecánica ordinaria, donde el espacio interviene a título de elemento descriptivo, se considera siempre la posición como una relación entre dos objetos por lo menos. El viejo conflicto entre espacio absoluto y relativo, aunque vivo todavía en las discusiones filosóficas, se halla ya muerto y definitivamente resuelto en la ciencia. En el lugar apropiado dentro de este mismo capítulo hablaremos más extensamente acerca de este punto; aquí nos limitamos a hacer notar que toda ley de la mecánica, incluso de la mecánica newtoniana, debe especificar un *sistema de referencia* espacial para ser aplicable, por lo cual se niega, en forma efectiva el carácter absoluto del espacio. Pero si el espacio es una relación entre objetos, ¿cómo puede ser una propiedad de un cuerpo y cómo puede ser dejado atrás?

Otro punto débil del argumento de las propiedades radica en su inexactitud. Atribuir espacio a los cuerpos era plausible en la vieja teoría mecánica de la naturaleza, que consideraba a todos los cuerpos como *plenamente* homogéneos e impenetrables; mas la teoría atómica ha debilitado notoriamente tales nociones, pues nos ha enseñado a con-

siderar ocupada por lo que queda de la materia (las partículas elementales) solamente una porción infinitesimal del espacio de los cuerpos: los gases, los líquidos e incluso los sólidos se difunden unos en otros, y el volumen de cada objeto ha dejado de ser una medida invariante; por otra parte, los fotones se interpenetran sin interacción conocida, pese a ser verdaderamente materia (en virtud de su masa). Es muy probable que podamos decir con razón que si en los tiempos de DESCARTES, MORE, NEWTON y KANT se hubiese sabido todo esto tal vez no hubiera surgido jamás el argumento de las propiedades.

Estas consideraciones hacen muy difícil la defensa del aserto de que los cuerpos "poseen su propio espacio"; el golpe fatal, sin embargo, le viene asestado desde otra dirección. Admitimos que pueda decirse en un sentido razonable que los objetos de grandes dimensiones de nuestra experiencia común *tienen* posición, velocidad, color, etcétera; la relación posesiva es en este caso sostenible y definible, pero, en vista de las consideraciones presentadas al final del capítulo VI, ya no puede afirmarse lo mismo de las cosas que tienen magnitudes atómicas: la relación posesiva y, con ella, la atribución de propiedades se hacen aquí fundamentalmente problemáticas, y el significado del espacio y el tiempo adquiere nuevas características, que explicaremos más ampliamente en los capítulos dedicados a la mecánica cuántica (capítulos XVI a XVIII).

III. El argumento de la localizabilidad puede ser atacado a causa de su método operacional, ya que cada vez es más patente que las operaciones no constituyen el único medio ni, frecuentemente, el más adecuado para definir conceptos científicos (véase el capítulo XII). Pero enfrentémonos con la cuestión en su propio terreno. Se nos dice que la operación de caminar hacia algo o de ponernos en el lugar de algo establece la existencia de ese vago algo. Mas, ¿por qué hacer tan fundamental la operación de "desplazarnos"? Parece que una operación es tan buena como otra. Según el argumento que estamos examinando, caminar hacia un objeto y encontrarlo demuestra su presencia; caminar hacia un objeto y no encontrarlo demuestra la existencia del espacio.

De la misma manera, arrojar piedras a un objeto y encontrar que rebotan demuestran la presencia del objeto. Pero, ¿estamos justificados para suponer la existencia de un continuo "balístico" porque podamos arrojar piedras y encontrar que no rebotan? O, para utilizar otra operación, uno puede lanzar gritos al objeto y formularle preguntas; podría admitirse que una respuesta inteligible demostraba la presencia de un ser inteligente pero ¿justificaría la ausencia de respuesta la aseveración de que exista una especie de medio ambiente de inteligencia? El argumento se destruye, pues, a sí mismo al generalizarlo.

La consecuencia más importante a extraer de estas observaciones es la siguiente: Es preciso protegerse cuidadosamente de la tentación a hipostasiar el espacio en una entidad, entidad dada en y a través de la sensación inmediata, que penetraría toda experiencia y cuyas propieda-

des estarían fijadas exteriormente mediante la observación. El espacio no es totalmente una *abstracción* —en sentido literal— de la percepción directa: sostenemos que es una *construcción interpretativa* que desempeña el mismo papel que todas las demás. Efectivamente, en ninguna parte se hace más evidente el carácter construyente de los conceptos físicos que en el análisis del tiempo y el espacio; y, además, estos conceptos proporcionan un magnífico ejemplo de la multiplicidad y mutabilidad de las reglas de correspondencia: pues no existe una sola construcción interpretativa llamada espacio, sino muchas, todas las cuales corresponden a diferentes formas de la experiencia inmediata.

En esta sección hemos limitado nuestras observaciones principalmente al espacio. El tiempo podría ser tratado en forma muy semejante, pero la posición en favor de un tiempo sensorial que fluya independientemente es algo más débil: sólo el argumento de las propiedades puede ser aplicado sin modificación, mientras que el argumento *a* I, es enteramente inaplicable, y el *a* III es inútil tal y como está formulado. No obstante, puede darse a este último una apariencia de fuerza haciendo en la imaginación lo que no puede realizarse efectivamente (no podemos retroceder en el tiempo y localizar un instante pasado), esto es, sustituyendo los pasos de la versión primera por los tic-tacs de un reloj. Los dos argumentos restantes pueden refutarse con respecto al tiempo igual que se ha hecho con respecto al espacio.

7.3. Las cualidades espaciales y temporales de la percepción

A diferencia de muchas cantidades físicas, el espacio y el tiempo no pueden ser percibidos directamente. En esto se diferencian de la masa y de la fuerza, por citar sólo dos ejemplos; pues en el campo *P* existe un elemento llamado masa (el percatarse de algo impenetrable), existe una llamada fuerza (la sensación de acción muscular) y existen además las construcciones interpretativas masa y fuerza, que figuran en forma muy señalada en el análisis científico, en tanto que el tiempo y el espacio parecen carecer de esa cualidad tangible en el campo *P*, y presentarse bajo estos nombres fundamentalmente como construcciones interpretativas. Desde luego, no son los únicos que poseen este rasgo distintivo: los campos eléctricos, el alma y el *élan vital* son otros ejemplos de entidades que no cabe confundir lingüísticamente con elementos de la percepción; pero el espacio y el tiempo son quizá los representantes más sencillos de esta clase; por serlo, se ha advertido claramente su carácter esquivo, y no siempre se lo ha interpretado bien.

Lo dicho puede expresarse de otra manera: las palabras espacio y tiempo rara vez hacen referencia exclusivamente a la Naturaleza: designan generalmente contrucciones interpretativas situadas a una pequeña distancia del plano *P*.

Existen en la percepción factores que predicen o sugieren la forma-

ción de los conceptos de espacio y tiempo. Estos factores no se presentan como inequívocamente espaciales o temporales, sino que es preciso desenredarlos de otros factores igualmente vitales de la experiencia inmediata: el espacio desnudo, por ejemplo, llega hasta nosotros en *cuatro* formas diferentes, qor lo menos, que no quedan sintetizadas hasta que no alcanzan el nivel de la reflexión. Está primero el notorio *estar ahí* de las cosas, que es una cualidad que testifica su realidad, o sea, que son distintas de los recuerdos y los sueños (los cuales también son experiencias inmediatas). Esta cualidad de "estar en el espacio" es probablemente la más primitiva abstracción espacial del mundo sensible, y se hace más clara en el segundo ejemplo de experiencia espacial, la impresión de *posición relativa* de un objeto respecto a otros: aquí, la mera noción de estancia se despliega y se refuerza en cierto modo a sí misma, con lo que la percepción del espacio se hace más pronunciada y amplia. También encontramos el espacio en una tercera forma, en el *tamaño* de los cuerpos, aspecto que es completamente diferente de los otros a este nivel elemental de la percepción; por ejemplo, es esta experiencia del tamaño lo que introduce en la idea de espacio la característica de divisibilidad indefinida: la posición relativa no la habría sugerido. Y, finalmente, fundida en esta mezcla de cualidades, estancia, posición y tamaño, existe un elemento de mayor atractivo estético, una sensación de *vastedad* y de extensión indefinida que se nos presenta cuando levantamos la vista al cielo azul o escrutamos la negrura de la noche. En estas cuatro clases de experiencia han de encontrase principalmente las raíces sensoriales del espacio.

También el tiempo se aprehende indirectamente a través de ciertas cualidades mediatas de la experiencia. Son éstas un tanto similares a los ejemplos a través de los cuales se revela el espacio: la mera presencia de un acontecimiento o de una experiencia corresponde al estar ahí espacial; el tiempo relativo a otros acontecimientos es la contrapartida de la posición relativa; el intervalo ocupa el lugar del tamaño, y el decurso hacia la eternidad sustituye a la vastedad del firmamento.

Todos estos aspectos fragmentarios del espacio y el tiempo, al quedar unidos mediante la abstracción, reciben a veces el nombre de espacio y tiempo *privados* o *psicológicos*[2]. El procedimiento unificador lógico funciona ya en este caso como una regla de correspondencia, y eleva al espacio y al tiempo fuera y por encima del reino de las inmediateces, pero es indiferente que consideremos estas formas elementales de espacio y tiempo como dadas directamente en la sensación o no: radican cerca del plano *P* (fig. 6.1) pero ligeramente a su izquierda y, en todo caso, no poseen mucho interés científico. De hecho, los distintos espacios atribuíbles a formas diferentes de la experiencia sensible pueden tener propiedades contrarias: los ojos y los pies de un caminante

[2] Para un estudio más amplio, véase A. C. BENJAMIN: *Philosophy of Science*, Nueva York, The Macmillan Company, 1937, o R. B. LINDSAY y H. MARGENAU: *Foundations of Physics*, Nueva York, John Wiley & Sons, Inc., 1936.

fatigado discrepan frecuentemente en sus apreciaciones de las distancias; y las líneas que en perspectiva se ven convergentes resultan ser paralelas al sentido del tacto. A este nivel no existe explicación de las numerosas ilusiones ópticas; ni tampoco existe prueba alguna en favor de las diversas pretensiones de la geometría, según las cuales el espacio es homogéneo, isótropo, infinito, etcétera. Para comprender su significado es necesario mirar al tiempo y al espacio como construcciones interpretativas e indagar cuáles sean las reglas de correspondencia que les configuren en elementos significativos de la descripción científica.

7.4. La medición del espacio

Los conceptos estables del tiempo y el espacio aparecen cuando aprendemos a pasar desde las toscas experiencias hasta ahora consideradas hasta lo que hemos denominado el campo C; o, mejor, estos conceptos estables surgen gradualmente como entidades racionales cuando se consolidan en un todo unificado los resultados de muchos tránsitos de este tipo. El espacio, como ya hemos apuntado, no se relaciona con la experiencia mediante una sola regla de correspondencia; pero punto, línea, superficie, ángulo y distancia son construcciones interpretativas relacionadas casi exclusivamente con la experiencia sensible, y el espacio se construye a partir de ellas y de ciertos postulados. Lo que ahora nos interesa son los métodos que enlazan ciertas experiencias con puntos, líneas, etcétera, o, para expresarlo de otra manera, las reglas que nos permiten "reconocer" puntos, líneas, etcétera, matemáticos en la Naturaleza.

Algunas de ellas son tan evidentes y estamos tan acostumbrados a su empleo inconcuso que no sentimos escrúpulo alguno en decir: veo un punto. Claro que, estrictamente hablando, esto no es cierto, sino sólo una manera sugestiva de decir: veo un objeto lo suficientemente pequeño como para que pueda funcionar en mi intuición matemática como un punto (es decir, estoy enunciando, en realidad, una regla de correspondencia). De forma análoga, reconocemos en las líneas unas contrapartidas constructivas de objetos delgados. Es frecuente llamar idealizaciones a puntos y líneas, y los matemáticos alemanes utilizan para ellos el muy apropiado término de *Grenzbegriffe,* "conceptos límites", cosas no encontradas en la Naturaleza pero que nos están sugeridas por ellos y a las que se llega mediante una elaboración ideal efectuada sobre conceptos sensoriales. No queda mucho más que decir acerca de los puntos, las líneas, las superficies, etcétera, y su relación con la percepción; pero sí acerca de su mutua relación y esta información complementaria no proviene de la percepción. Así, una vez localizados estos elementos dentro de nuestra experiencia comprehensiva mediante reglas de correspondencia, realizamos una elección entre numerosas posibili-

dades lógicas de relacionarlas; *v. gr.,* las líneas se consideran formadas por puntos, generalmente por un número infinito de ellos, pero a veces por un número finito: la primera suposición conduce a los tipos de geometría con que estamos familiarizados, la segunda a los tipos más recientes de geometría finita; mas la experiencia inmediata no decide directamente esta cuestión.

Se necesita también, por otras causas, una distinción muy clara entre las reglas de correspondencia por medio de las cuales se sientan inicialmente cosas tales como puntos y líneas, y las propiedades racionales de que están dotadas. Pues la ciencia de la geometría avanza deductivamente, comenzando con proposiciones generales y descendiendo a las particulares, y, como es bien sabido, no puede definir todos sus términos en su propio discurso sin hacerse circular: tiene que suponer la comprensión de algunos términos para conferir significado a sus proposiciones iniciales. Esta situación goza de reconocimiento general, de suerte que el lógico admite como indefinibles o primitivos en su sistema conceptos tales como los de punto, línea y círculo; ahora bien, la condición insular a que la lógica relega a tales entidades queda corregida por las correlaciones epistémicas.

Ni siquiera en la condición insular puede decirse que las construcciones carezcan por completo de significado, ya que pueden desempeñar ciertos papeles formales como resultado de su funcionamiento dentro del contexto de los postulados. NORTHROP ha puesto de relieve este punto, y ha acuñado la expresión "concepto postulatorio" para asegurar su reconocimiento. Dejemos para el capítulo XII el estudio detenido de cómo alcanzan pleno significado los conceptos científicos.

Nuestro análisis adquiere mayor interés cuando volvemos la atención hacia conceptos espaciales ligeramente más complejos, cuales son la longitud y la distancia. Aquí es posible todavía el tránsito desde una regla graduada a una línea de longitud definida o desde la impresión visual de la distancia hasta un número determinado de metros, pero rara vez se confía en él; y en su lugar encontramos una regla de correspondencia *enunciable,* una prescripción para la medida. Al paso que avanzamos hacia ejemplos menos familiares, las reglas intuitivas que eran aplicables a puntos y líneas dejan de funcionar para establecer la distancia; por ejemplo, nadie trataría de adivinar la distancia entre dos estrellas o la longitud de onda de la luz roja como lo hace para la distancia entre objetos terrestres: en tales circunstancias las reglas de correspondencia se convierten en procesos operacionales.

Ahora bien, han existido y existen muchas formas de medir distancias, mas no es preciso someter a examen todas ellas. El pie de rey, por la dificultad de disponer de él, se vio pronto abandonado como regla de medida; e igualmente claros son los inconvenientes de la cinta de goma. Los físicos, por tanto, han adoptado el objeto a su juicio más satisfactorio para determinar distancias, el llamado "cuerpo rígido"; y el método a emplear es sencillo: se tiende cuidadosamente

entre dos puntos un escantillón de un metro, y el número de veces que se lo haya tendido es el número de metros que componen la distancia. En otros casos se necesitan métodos distintos: las estrellas se localizan mediante rayos luminosos, los cañones por el sonido, los peces y los submarinos por ondas ultrasónicas, pero todos estos métodos vuelven finalmente a la yarda o al metro tradicionales, un cuerpo supuestamente rígido en relación al cual pueden ser calibradas las longitudes de otros objetos y las velocidades de la luz y el sonido. Y de esta manera parece quedar resuelto el problema de la medición de distancias.

Estaba resuelto hasta que el matemático moderno despertó de los gratos sueños que había engendrado el famoso arrullo de EUCLIDES. Empezó de pronto a formularse desconcertantes preguntas como las siguientes: cuando digo que la distancia entre los puntos *A* y *B* es de ochenta metros me refiero, naturalmente, a la distancia *más corta* entre *A* y *B*; pero ¿cómo puedo estar seguro de haber medido la distancia más corta?: ¿no estaré confundiendo "distancia más corta" con "distancia a lo largo de la línea de visión"?; ¿por qué han de ser iguales las dos? Comprueba así que el concepto de distancia no es tan sencillo como originariamente suponía. Muy bien, dice, de ahora en adelante entenderé por distancia la distancia *más corta* entre dos puntos y no tendré en cuenta las líneas de visión, pues esto sería equivalente a suponer que la luz se mueve siguiendo el camino más corto: tenderé mi regla de a metro a lo largo de todos los caminos posibles entre *A* y *B* y encontraré cuál es el más corto. Con esta loable resolución pone manos a la obra, determina la distancia más corta y demuestra al hacerlo que la luz se mueve a lo largo de la distancia más corta.

Si es un buen empirista continuará con este sencillo método y medirá distancias a lo largo de la línea de visión, toda vez que se encuentra cumplidamente satisfecho de la corrección de tal procedimiento.

Pero un día leerá a POINCARÉ o a EINSTEIN, y surgirán de nuevo las dudas, dudas más alambicadas ahora. ¿Qué motivos tengo para suponer que no se alteran las propiedades de la varilla rígida cuando la uso de diferentes maneras? Es ciertamente concebible que todos los objetos físicos cambien de tamaño cuando pasemos de un lugar a otro; y si nuestras varas de medir, nuestros pasos y nuestros ojos, cambian todos en igual proporción, esos cambios no se reflejarán en la percepción inmediata. La idea de que todas las cosas conspiren para engañarnos parece grotesca al principio, pero deja una duda cuya intensidad aumenta a medida que continúa la reflexión: el ejemplo de POINCARÉ[3] pone de manifiesto todo lo que ello implica.

Supongamos, dice, que nuestro universo sea un gran disco circular con una distribución muy especial de temperaturas: el centro estará muy caliente y los bordes se hallarán en el cero absoluto. Imaginemos ade-

[3] H. POINCARÉ: *Foundations of Science*, págs. 75 y sigs., Science Press, 1946.

más que la dimensión lineal de todos los objetos sea proporcional a la temperatura absoluta y que nosotros no tengamos ningún sentido de calor ni de frío. En ese caso, al caminar desde el centro hacia el borde de nuestro universo, nuestros pasos disminuirán de tamaño sin que nos demos cuenta, e iremos acercándonos eternamente al límite sin llegar a alcanzarlo. De hecho, estaríamos engañados no sólo en lo que se refiere a las distancias, sino incluso respecto a algo tan fundamental como es la finitud de nuestro universo.

La improbabilidad de semejante universo es algo que tal vez milite fuertemente en contra suya: la variabilidad de las propiedades ocultas de ese mundo discoide parece una conjetura artificial. Pero veamos un momento. Las propiedades *conocidas* de los objetos geométricos cambian de formas muy curiosas de un lugar a otro, y la constancia constituye la excepción más bien que la regla. ¿cuál es, por ejemplo, la superficie más probable? Hay esferas, elipsoides, superficies irregulares... y hay planos; sin ningún conocimiento anterior difícilmente podríamos asegurar que una determinada superficie, cuya naturaleza hubiéramos de adivinar, sea un plano: es mucho mayor la probabilidad de que sea una superficie irregular, teniendo en cuenta la frecuencia de objetos irregulares; y, sin embargo, el plano es la *única* superficie bidimensional cuyas propiedades no se alteran al pasar de un punto a otro. Además, el cambio de propiedades producido en una superficie irregular pasaría inadvertido para un observador que limitara sus observaciones a dos dimensiones, pues la curvatura no puede hacerse patente en circunstancias en las que el número de dimensiones de la multiplicidad considerada sea igual a las que el observador admita[4]. Ahora bien, nuestro mundo es tridimensional, y nosotros confinamos nuestras observaciones a tres dimensiones. ¿No es posible entonces, o incluso probable, que nuestro juicio acerca de la permanencia de las dimensiones esté equivocado?

Volvemos ahora al problema que nos habíamos planteado. El cuidadoso observador ha medido la distancia entre *A* y *B* a lo largo de la línea de visión y ha encontrado que es la más corta. Pero, ¿y si su vara de medir adquiriese su máxima longitud al ser tendida en esa dirección? Es concebible que, orientado de alguna otra manera tal escantillón, juntamente con todos los demás objetos que experimenten un giro en esa dirección, se acorte lo suficiente para que haya de ser tendido mayor número de veces incluso en una distancia menor. La primitiva conclusión respecto a cuál es la distancia más corta entre *A* y *B* se revela entonces claramente errónea.

Nos estamos aproximando ya a la resolución del dilema: va poniéndose en claro que las reglas de correspondencia, las correlaciones epis-

---

[4] Un ser cuya percepción se hallara limitada a dos dimensiones (derecha-izquierda, adelante-atrás) tomaría una esfera tridimensional cuya superficie pudiese explorar libremente por un plano bidimensional. Véanse también los ejemplos incluidos al final de este capítulo.

témicas solas, no bastan para fijar las construcciones interpretativas científicas. Pero no será ocioso que nos aproximemos un paso más a los detalles del ejemplo propuesto. A efectos de estabilizar las reglas de correspondencia que imparten un significado empírico al término *distancia,* se ha hecho necesario introducir *direcciones tipificadas,* en las que han de practicarse todas las mediciones: en vez de tender la vara a lo largo de lo que parece ser la línea de visión, accedemos a desarrollar las mediciones siguiendo tres direcciones prefijadas, llamadas ejes de coordenadas (estos últimos pueden ser ejes cartesianos —o sea, rectangulares— o cualquier otro conjunto de ellos). La medición produce así tres números, Δx_1, Δx_2, Δx_3, respecto de los cuales poseemos esta certeza: Cualquiera que sea la dirección de la línea *AB,* las coordenadas Δx_i no contienen ninguna ambigüedad derivada de la falta de isotropía [5] del universo. Y a partir de estas coordenadas puede construirse la longitud *AB.*

Esto es lo más lejos que puede llevarnos la correlación epistémica: para continuar a partir de aquí es preciso introducir postulados construyentes, que conducirán a diferentes clases de espacio. Los axiomas de la geometría euclidiana, que fueron tenidos por evidentes hasta los tiempos de GAUSS, LOBATCHEVSKI, BOLYAI y RIEMANN, se expresaban mediante la ecuación:

$$\Delta s^2 = \sum_i \Delta x_i^2$$

siendo Δs la distancia *AB* y las Δx_i, las coordenadas rectangulares. Sabemos ahora que esto es una suposición muy especial, no dictada por la experiencia inmediata, las reglas de correspondencia ni la necesidad lógica. Pero dejamos para la sección siguiente el examen del espacio engendrado por tales postulados adicionales.

Para determinar el significado completo de las áreas, los volúmenes y los ángulos se precisa un análisis muy parecido. Los ángulos son cosas relativamente sencillas y por tanto, quizá, sumamente instructivas. Los elementos epistémicos que intervienen en la definición de un ángulo plano son la longitud de un lado y la longitud de un arco circular que cruce el ángulo en torno al vértice. En la geometría euclidiana la medida del ángulo (en radianes) es la razón del arco al lado; lo cual, sin embargo, no es una definición impuesta por la experiencia sensible ni por la lógica: es también una estipulación construyente. Un ángulo sólido es la razón del área de una superficie esférica que abarque el ángulo al cuadrado de la distancia entre esa superficie y el vértice; y de nuevo resulta manifiesto el elemento arbitrario contenido en la definición. Tal vez hayamos expuesto con suficiente detalle las complejidades de la geometría y pueda, por tanto, perdonársenos si ahorramos

[5] **Universo no isótropo es aquel cuyas propiedades son diferentes en direcciones también distintas.**

al lector las consideraciones técnicas que surgen en esta coyuntura; lo que queda dicho ilumina el *status* epistemológico de la geometría al poner de manifiesto cómo se aproximan sus elementos a la Naturaleza en algunos puntos y cómo, sin embargo, deben la mayor parte de su significado a postulados puramente construyentes.

7.5. La medición del tiempo

"El tiempo es la variable independiente en las leyes de la mecánica" [6]. Esta es la mejor definición que puede darse del tiempo y, sin embargo, no define completamente la idea. Porque, ¿de dónde obtenemos las leyes de la mecánica? ¿no están formuladas de conformidad con una experiencia que supone ya de antemano el tiempo? Estas interrelaciones de conocimientos (la red de postulados y observaciones que hemos encontrado) exigen para su adecuada comprensión que se separen las cualidades del tiempo que se hallan epistémicamente enraizadas en la Naturaleza de aquellas otras que se establecen construyentemente Examinemos ante todo las primeras.

Nuestra manera inmediata de percatarnos del tiempo se halla enlazada al tiempo conceptual en virtud de la elección de unidades naturales efectuada y de unos procedimientos perfectamente escogidos que nos facultan para subdividir tales unidades. Las más destacadas entre las unidades naturales de tiempo son el año y el día; y si bien su significado rara vez supone dificultad para una persona práctica, dichas sencillas unidades originan no pocas dificultades al científico. Un breve examen de estas últimas bastará para hacernos ver en qué sentido exacto son "dadas"; y ello señalará también una interesante diferencia entre la unidad de distancia y la unidad de tiempo: mientras que la experiencia nos ofrece numerosos patrones de distancia, fácilmente reproducibles y razonablemente constantes, los patrones naturales de tiempo son escasos en número y difíciles de certificar.

Hablando en términos generales, el año es el período de revolución de la tierra alrededor del sol. Pero su longitud depende del acontecimiento que se haya elegido como referencia para el período en cuestión, y los acontecimientos están mal definidos en un universo en el que todos los cuerpos se mueven. Así, si especificamos que el año es el intervalo entre un paso aparente del sol por un punto del firmamento, fijo con respecto a las estrellas, y otro paso semejante, obtenemos lo que se denomina el *año sideral,* cuya duración es de 365 d. 6 h. 9 min. y 9 s., entendiéndose por estos días, horas, minutos y segundos unidades solares (que vamos a definir más adelante). El *año tropical* es el intervalo entre dos sucesivos equinoccios vernales, que asciende a 365 d., 5 h., 48 min., y 46 s., y es la unidad que tiene importancia para nuestras vidas cotidianas, ya que camina al par de las estaciones. (La diferencia entre

[6] Esta afirmación se encuentra frecuentemente en los libros de mecánica.

el año tropical y el sideral fue descubierta por HIPARCO en el año 130 a. de J. C., para gloria perdurable de la ciencia griega). Si el período de la revolución de la tierra se mide desde un momento en que ésta se halle más próxima al sol (perihelio) hasta el siguiente momento en que se produzca igual circunstancia, el intervalo así obtenido es el *año anomalístico,* y su duración es de 365 d., 6 h., 13 min., y 48 s. Finalmente, el tiempo que se extiende entre dos nodos lunares recibe el nombre de *año nodal* y tiene una duración de 346 d., 7 h. y 53 min; aunque muy distinto de los otros, tiene valor como base para predecir los eclipses solares y lunares. Dado todo esto, sería realmente ingenuo preguntar cuál es el verdadero año.

Examinemos ahora el día, el período de rotación de la tierra alrededor de su propio eje. También aquí es necesario expresar qué acontecimiento recurrente ha de señalar el fin de este período: si tomamos como tal el tiempo transcurrido entre dos sucesivas culminaciones de una estrella fija obtenemos el *día sideral*; y si lo medimos desde un apogeo solar hasta el siguiente, observando la longitud del gnomon en un reloj de sol, obtenemos el *día solar.* Como la tierra gira también sobre su eje al mismo tiempo que gira alrededor del sol, el número de culminaciones del sol que ve un observador terrestre es menor en una unidad al de culminaciones que ve de una estrella fija; el año, por tanto, contiene un día solar menos que días siderales, y si tiene unos 365 días solares debe tener unos 366 días siderales; más exactamente, el día sideral es 3 min. y 56 s., más corto que el día solar.

La facilidad de observación hace más útil el día solar que el sideral. Teniendo esto en cuenta, es una lástima que la duración del día solar varíe a lo largo del año. La causa de tales variaciones ha de buscarse principalmente en la excentricidad de la órbita terrestre. Para corregirlas, el astrónomo introduce un ficticio sol "medio" que pasa por el equinoccio vernal al mismo tiempo que el sol real, pero que se mueve con una velocidad angular uniforme a lo largo del ecuador celeste; y todos los tiempos referidos a este sol ficticio reciben el nombre de *tiempos solares medios.* La diferencia entre tiempo medio y tiempo verdadero solar se conoce con el nombre de ecuación del tiempo; es igual a cero dos veces al año, en mayo y septiembre, pero alcanza un máximo de 15 minutos en otros días.

Años y días son los fragmentos de duración que el ingenio científico debe tejer en la hebra del tiempo; pero no existen ritmos naturales sencillos de período conveniente en relación a los cuales pueda medirse el día, ya que el latir del corazón humano es demasiado irregular. La ciencia primitiva se fijó, por ello, en el movimiento continuo para medir y significar el flujo del tiempo. La clepsidra egipcia, de la que se conservan referencias en las metáforas latinas *aquam dare, aquam perdere* (dar, perder tiempo), era un ingenio similar a un reloj de arena, y su uso depende de la suposición de que intervalos iguales de tiempo corresponden a volúmenes iguales de agua. Existe la creencia de que

GALILEO descubrió el isocronismo de las oscilaciones del péndulo mientras oraba en la catedral de Florencia, cronometrando con los latidos de su pulso el vaivén de una lámpara oscilante; mas luego, invirtiendo la situación, construyó un medidor del pulso utilizando un péndulo oscilante. Después, HUYGENS construyó un reloj de péndulo accionado por un resorte, con lo cual se tuvo un sencillo ritmo artificial que comprobar cuidadosamente con relación al día solar, y el arte de medir el tiempo recibió un gran impulso. A partir de entonces fueron construyéndose relojes cada vez mejores, basados en ritmos de notable constancia, hasta que en nuestra era, hemos aprendido a emplear el sutil ritmo de las ondas luminosas y el intervalo entre dos destellos de radar.

Todos los relojes establecen reglas de correspondencia operacionales entre duraciones percibidas y tiempo conceptual. Pero ¿resuelven el problema, o continuamos todavía en una ambigüedad semejante a la que entraña la relación entre coordenadas medidas y longitud? Eso depende de las razones que tengamos para creer que los relojes mantienen un ritmo constante. Para resolver la cuestión contamos el número de veces que bate un péndulo al cabo de un día (un día sideral, por ejemplo, debido a que es el menos inseguro): para nuestra satisfacción, todos los días contienen 43.200 oscilaciones, y nuestra cuestión parece contestada, siempre que supongamos que todos los días siderales tienen la misma duración. Pero los días se calculan en relación a las estrellas, y las estrellas poseen movimientos propios; con el fin de orillar esta dificultad, el astrónomo introduce la adecuada corrección que exige su movimiento, basándose en el supuesto de que éste es uniforme, ya que ¿por qué no iba a ser uniforme teniendo en cuenta la ausencia de fuerzas? En la fase final, pues, obligamos al misterio a retroceder hasta las leyes newtonianas del movimiento: *postulamos* que los cuerpos no influídos por fuerzas se mueven de forma tal que distancias iguales arrojen tiempos iguales. No hemos avanzado, al fin y a la postre, mucho más allá de los egipcios y de sus clepsidras en lo que se refiere a suposiciones básicas: no hay manera de eliminar del tiempo conceptual los elementos puramente construyentes.

7.6. EL ESPACIO Y EL TIEMPO CONCEPTUALES

Nos vemos, así, en la necesidad de examinar las propiedades postulatorias del espacio y el tiempo. Como ya hemos apuntado, lo que las ha introducido en el campo de nuestra investigación ha sido la necesidad de dar respuesta a las siguientes preguntas: ¿cómo puede componerse la *distancia* a partir de *coordenadas medidas*?; y ¿cómo puede garantizarse que dos intervalos de tiempo sean iguales? La razón por la que no planteamos la segunda pregunta con relación al espacio estriba en que los intervalos espaciales pueden compararse por superposición, lo cual es imposible para el tiempo; mientras que la razón por la que no formulamos la primera pregunta acerca del tiempo consiste en que éste es unidi-

mensional, lo que es otra forma de decir que el tiempo y el intervalo medido son una y la misma cosa.

Se ha convertido en habitual abordar el problema de la distancia por medio de un artificio matemático llamado la *métrica* del espacio. Como recordará el lector, en la geometría ordinaria la distancia *ds* entre dos puntos de un plano, separados por *dx* y *dy*

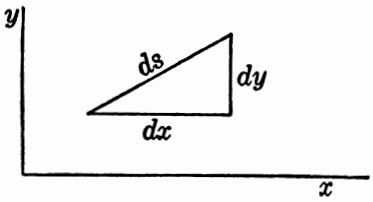


Figura 7.1

(véase figura 7.1) está dada por el teorema de PITÁGORAS:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2$$

Si estos puntos se hallan sobre una esfera de radio r y su posición está dada por las coordenadas polares θ y φ, el cuadrado de la longitud del arco comprendido entre ellos es

$$ds^2 = r^2 \operatorname{sen}^2 \theta \, d\varphi^2 + r^2 d\theta^2.$$

En un sistema de coordenadas cuyos ejes sean rectilíneos, como en el sistema cartesiano, pero que se corten formando un ángulo distinto de 90°, encontramos

$$ds^2 = adu^2 + bdudv + cdv^2,$$

supuesto que denominemos *du* y *dv* a los intervalos de coordenadas. Estos tres resultados, y muchos otros, pueden reunirse escribiendo

$$ds^2 = g_{11}dx_1^2 + g_{12}dx_1dx_2 + g_{21}dx_2dx_1 + g_{22}dx^2, \tag{7.1}$$

que es la expresión de GAUSS para un arco de superficie; en ella, x_1 y x_2 designan cualesquiera coordenadas con referencia a las cuales pueda expresarse la posición, y las cantidades g_{11}, g_{12}, g_{21} y g_{22} son, o funciones de x_1 y x_2, o constantes que asumen diferentes formas o valores para superficies diferentes y distintos sistemas de coordenadas. Con sólo mirar las g, el matemático puede decir si la superficie sobre la que se halla *ds* es un plano, una esfera, un elipsoide, etcétera: son características de la superficie.

La ecuación (7.1) puede generalizarse a tres dimensiones, en cuyo caso *ds* se convierte en un elemento de línea, el elemento de longitud entre dos puntos de un espacio tridimensional. Hay ahora en conjunto nueve funciones g, llamadas *potenciales* del espacio —aunque solamente seis de ellas son independientes— y su totalidad se denomina a veces el tensor métrico, o, abreviadamente, la métrica del espacio; y es habitual resumirla utilizando la siguiente notación

$$ds^2 = \sum_{ik} g_{ik}x_ix_k,$$

en donde los índices i, k van de 1 a 3. Mas la cuestión importante es: ¿cuál es el significado de las diferentes elecciones de las g_{ik}?

En dos dimensiones podemos imaginarlas como definitorias de diferentes tipos de superficie. Desgraciadamente, la intuición geométrica, desentrenada en estas sutilezas, nos abandona cuando ascendemos a tres dimensiones; y no tenemos más remedio que extraviarnos en una contemplación carente de principios de lo que parece ser solamente "*espacio*" y queda sin definir, a menos que hagamos uso de la métrica como guía. Existen, de hecho, tantos *espacios,* cada cual con una métrica propia, como superficies intuíbles (más que éstas, en realidad); y se puede caracterizar cada uno de ellos por su conjunto propio de g_{ik}. El espacio euclidiano, por ejemplo, representado en coordenadas cartesianas, tiene la siguiente métrica

$$\begin{Vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Vmatrix}$$

Aquí, el lector debe suponer que filas y columnas están rotuladas con 1, 2, 3; el elemento g_{ik} se halla entonces en la intersección de la columna i con la fila k; y por consiguiente, la métrica euclidiana para el espacio tridimensional es: $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$.

Cuando la métrica difiere de ésta, que es la forma más sencilla posible, se produce una de dos posibilidades: o bien el espacio continúa siendo euclidiano pero se ha elegido para su representación un grupo distinto de coordenadas, o bien el espacio no es euclidiano. (Para determinar cuál de estas dos proposiciones es verdadera, pueden someterse las g_{ik} a ciertas pruebas, sobradamente conocidas de los matemáticos y que no nos interesan por el momento.) En este último caso encontraríamos unos fenómenos muy extraños —desviación de la suma de los ángulos de un triángulo del valor de 180°, apartamiento de la razón de la circunferencia al diámetro de un círculo del valor π, etcétera—, hechos que frecuentemente se presentan como si fuesen incomprensibles, si bien, en realidad, solamente son poco familiares.

El hombre de ciencia hace cosas aún más extrañas. Supongamos que adopte un espacio no euclídeo, en el que la suma de los ángulos de un triángulo no será igual a 180°, y que, poniéndose después a medir, encuentre que la suma de los tres ángulos vale 180° exactamente; ¿abandona por ello el uso de su espacio no euclídeo? ¡Ni mucho menos! En determinadas circunstancias puede decir que su instrumento de medición estaba torcido o que se comportaba con la acostumbrada perversidad de todos los objetos, recurriendo a cualquier astucia con el fin de fingir el resultado de 180°: se aferra, pues, a su métrica original con una tenacidad que casi desafía todo testimonio empírico. Al llegar a este punto, tal vez acudan a la mente del lector visiones de torres de marfil o de largas barbas, si no de almohadilladas celdas; pero debemos sus-

traerle a sus diversiones privadas: el científico actúa de completa buena fe; lo que ocurre es que su suposición referente a la métrica *no* es susceptible de prueba directa.

La elección de métrica es un elemento construyente del método científico; elemento similar, sin duda, a otros muchos, pero que es más retador en sus consecuencias y nos sacude más vigorosamente respecto de las preconcepciones que nos son familiares: cae en el campo C a considerable distancia de P. Las dx_i, juntamente con las especificaciones para medirlas, enlazan C con los puntos situados en P; las g_{ik}, al quedar especificadas por funciones matemáticas, las incorporan en un fértil nexo de relaciones lógicas y matemáticas *basadas en otros postulados*; y éstos determinan la elección de la métrica, que, como hemos visto, se halla tan extrañamente alejada de la refutación empírica. En la teoría de la relatividad el postulado importante es el que exige que las leyes de la naturaleza (¡no la métrica!) tengan una forma particularmente sencilla[7]; esto no basta por sí solo para determinar la métrica, pero permite fijarla cuando se unen a ella los hechos de la observación directa. Debe recalcarse, por consiguiente, que la elección de métrica no se realiza de una manera arbitraria, no por meras razones de conveniencia, ya que ha de satisfacer, *a*) los requisitos metafísicos de las construcciones interpretativas (en una forma muy especial aquí) y *b*) los hechos empíricos. LINDSAY y MARGENAU[8] han estudiado los detalles de este procedimiento.

Hemos ofrecido un esbozo del método moderno de conferir unas propiedades específicas al espacio conceptual; y vamos a recorrer ahora un breve panorama de los aspectos históricos y el significado físico de diversos procedimientos formales. El espacio euclidiano fue el espacio de NEWTON y de todos sus predecesores; y, como ya hemos visto, los potenciales de tal espacio son *constantes* (cuando están referidos a las coordenadas cartesianas). El significado físico de esta circunstancia es doble: el espacio newtoniano posee las mismas propiedades *en todas las direcciones* y *en todos los puntos;* es, por lo tanto, isótropo y homogéneo, o *uniforme*; de ahí que los objetos no cambien de propiedades en ninguna parte: el espacio es infinito porque la constancia de las propiedades no le permite llegar a un fin. Si es absoluto o relativo en el sentido filosófico de ser una "entidad o una relación", la métrica no lo dice, aunque la intuición de NEWTON aceptó indudablemente el primer término de la alternativa, simplemente porque no queda contradicho por las propiedades constantes del espacio euclidiano; y hemos de ver que, al aceptarla, la intuición se pliega a la persuasión de lo acostumbrado. Pero existe otro corolario más importante implicado por las constantes g; es la invariancia de las propiedades espaciales en el tiempo y, debido a ello, también en el curso del movimiento: en el espacio newtoniano las lon-

---

[7] La trayectoria de cualquier partícula debe ser una línea geodésica

[8] *Op. cit.*

gitudes no se ven afectadas por el paso del tiempo ni por el movimiento.

Nuestra experiencia no confiere a esta suposición ningún carácter ni evidente ni necesario: los procedimientos operacionales para determinar las dx_i, al hacer referencia a situaciones empíricas, no implican *a priori* absolutamente nada acerca de la independencia de las mediciones espaciales y temporales. El milagro no es que la física moderna sea capaz de reconocer y utilizar la interdependencia espacio-temporal en su teoría de la relatividad, sino, más bien, que la descripción no relativista estuviera tan cerca del éxito; y cabe ver en esta afortunada contingencia la razón por la que la física, protegida por una providencia favorable, pudo disfrutar la sencilla y bien regulada juventud que la ha conducido a una vigorosa madurez. Otras ciencias han tenido que enfrentarse con relatividades desde su misma infancia.

La posición de NEWTON respecto a la independencia del espacio y el tiempo dió también lugar a importantes consecuencias para este último: el espacio no se inmiscuye en el tiempo; y de aquí que el movimiento no afecte en absoluto a la escala de tiempos. Con palabras de NEWTON, "el tiempo absoluto, verdadero y matemático, por sí mismo y por su propia naturaleza, fluye uniformemente sin tener en cuenta nada externo"; y acerca del espacio dijo cosas igualmente amplias y generales: "El espacio absoluto, por su propia naturaleza, sin tener en cuenta nada externo, permanece siempre igual e inmutable." Lo que él denominaba absoluto y verdadero deberíamos ahora verter, preferiblemente, por conceptual o, en nuestra más específica terminología, como "construyente"; pues significa lo contrario a "sentido".

El físico moderno no profesa ya el credo de NEWTON: ha descubierto espacios que son igualmente compatibles con las observaciones y que permiten a las leyes de la naturaleza asumir formas fundamentalmente más simples; de hecho, a la vista de los principios metafísicos examinados en el capítulo V, prefiere combinar el espacio y el tiempo en un agregado tetradimensional. Pero antes de considerar estos asuntos, de carácter más técnico, no estará de más que examinemos la bendición filosófica pronunciada por KANT sobre las concepciones de NEWTON.

7.7. EL ESPACIO Y EL TIEMPO EN KANT

Rara vez ha recibido una teoría física tan persuasiva y cuidadosa transcripción en términos filosóficos como la mecánica newtoniana. La transcripción fue la epistemología de KANT. Un examen de esta doctrina nos depara, por tanto, una ocasión no sólo de dejar constancia de su monumental talla, sino también de mostrar en qué aspectos el vuelo de la física moderna más allá de NEWTON ha provocado la caída de la concepción kantiana. Puesto que el espacio y el tiempo constituyen ejemplos cruciales de tal crítica, nos creemos en libertad de reproducir

aquí *in extenso* varios pasajes pertinentes de la "Crítica de la Razón Pura" [9].

1. El espacio no es un concepto empírico, que hayamos extraído de experiencias exteriores. Pues, para que sea posible retrotraer ciertas sensaciones a algo fuera de mí (esto es, a algo que se encuentre en una parte del espacio distinta de aquella en que yo estoy), y, de igual modo, para que pueda yo representármelas como exteriores y contiguas unas a otras —y por consiguiente, no sólo como meramente diferentes, sino también en lugares distintos—, la representación del espacio debe subyacer ya antes. De ahí que esta representación no pueda proceder de las relaciones de los fenómenos externos a través de la experiencia; mas, por el contrario, esta experiencia externa solamente es posible a través de la expresada representación antecedente.

2. El espacio es una necesaria representación *a priori* que sirve de base a todas las intuiciones externas. Jamás podemos imaginar o representarnos la no existencia de espacio, aunque podamos pensar con bastante facilidad que no se encuentra en él objeto ninguno. Debe, por tanto, considerárselo como condición de la posibilidad de los fenómenos, y en manera alguna como determinación dependiente de ellos; es una representación *a priori* que, necesariamente, subyace a los fenómenos externos.

3. El espacio no es ningún concepto discursivo o, como se suele decir, general de las relaciones entre cualesquiera cosas, sino una intuición pura. Pues, en primer lugar, únicamente podemos representarnos un solo espacio, y cuando hablamos de espacios diversos no entendemos con ello sino partes de un solo y mismo espacio único; además, esas partes no pueden preceder a este único y omnicomprensivo espacio, como si fuesen sus partes integrantes (a partir de las cuales pudiera formarse el agregado), sino que solamente pueden ser pensadas *en él*. El espacio es esencialmente uno, de suerte que la multiplicidad que hay en él, y, por lo tanto, el concepto general de espacios cualesquiera dependen exclusivamente de limitaciones. De lo cual se sigue que hay una intuición *a priori* (que no es empírica) que subyace a todos nuestros conceptos del espacio; por lo que, además, ningún principio de la geometría —por ejemplo, que la suma de las longitudes de dos lados de un triángulo es mayor que la longitud del tercer lado—, se deduce jamás a partir de los conceptos generales de línea y triángulo, sino de la intuición, y esto *a priori*, con certeza apodíctica.

4. El espacio se representa como una magnitud infinita dada.

---

[9] Doctrina trascendental elemental, 1.ª Parte, Sección I [§ 2; págs. 23 a 25 de la 1.ª ed. (de 1781) y 38 a 40 de la 2.ª (de 1787). Hemos traducido directamente del original alemán esta cita de KANT, en lugar de retraducir la descuidada versión inglesa de MEIKLEJOHN, transcrita por el autor. (T.)].

> Ahora bien, es preciso considerar, verdaderamente, todo concepto de este género como una representación comprendida en una multitud infinita de diferentes representaciones posibles (en cuanto rasgo característico común a todas ellas), y que, por lo tanto, comprenderá *bajo sí* a éstas; pero ningún concepto en cuanto tal puede ser considerado como si comprendiese *dentro de sí* una multitud infinita de representaciones. Sin embargo, el espacio se considera de este modo (pues todas sus partes están a la vez en lo infinito); así pues, la representación original del espacio es una intuición *a priori,* y no un concepto.

Crítica. Si se entiende que el punto esencial del párrafo 1 consiste en el aserto de que el espacio conceptual no se toma de la experiencia inmediata, preciso es decir que la física moderna lo confirma; pero niega la alegación de que deba existir de antemano un determinado espacio métrico como presupuesto lógico de la experiencia. La verdad es que recela de la tendencia de KANT a la generalización desenfrenada, del trascendental salto que realiza desde la observación de que ciertos rasgos son muy comunes en la experiencia hasta la pretensión de que sean condiciones necesarias de toda experiencia. Es cierto que en la sensación se encuentran profusamente aspectos espaciales, pero lo mismo ocurre, por ejemplo, con la percepción del color, ¿por qué, entonces, no es el color una de las representaciones antecedentes de la experiencia externa?

La expresión kantiana "solamente es posible a través de" tiene que ponerse en tela de juicio, pues constituye el portillo por el que se deslizan muchas conclusiones injustificadas. *Posible,* aun en el templado racionalismo de KANT, significaba *imaginable,* o capaz de ser pensado; pero nadie ignora hoy que la imaginación es una facultad dócil, que asimila gradualmente lo que la ciencia enseña: se sabe que POINCARÉ afirmó que era capaz de visualizar el espacio de cuatro dimensiones, y la física moderna ha familiarizado a sus discípulos con procedimientos sumamente abstractos que, sin duda, ampliarán el ámbito de nuestra intuición. La palabra "posible" ha perdido así su pretensión de ultimidad como término descriptivo: su significado es ahora puramente lógico, y se refiere a estar libre de contradicciones. Desde luego, el espacio lo *está*; pero esto no lo coloca aparte de muchas otras construcciones interpretativas, y es una distinción menos importante de lo que KANT quiere que sea.

En el párrafo 2 se llevan hasta el extremo las erróneas implicaciones de "posible": el espacio se convierte en la *condición a priori de la posibilidad de los fenómenos.* Para valorar esta declaración nos vemos obligados a enfrentarnos, de una vez para siempre, con los sibilinos adjetivos *a posteriori* y *a priori.* No cabe duda de que estos términos, que señalan una contraposición epistemológica, se formaron para reflejar en la esfera epistemológica la contraposición lógica entre *sintético* y

analítico; y en las obras de KANT alcanzaron una importancia enorme, totalmente desproporcionada a su exigua sustancia, hallándose siempre a disposición del filósofo cuando necesitaba munición pesada en sus batallas.

Según KANT, un juicio puede ser clasificado de dos formas: *epistemológicamente* será o bien *a posteriori*, o bien *a priori*; lo primero cuando su contenido esté tomado de la experiencia, lo segundo cuando puede saberse que es verdadero sin la experiencia o con anterioridad a ella. *Lógicamente* será o sintético o analítico; aquello cuando el juicio no sea tautológico, esto cuando sea verdadero por la definición de los términos que entrañe. El hecho de que hubiera *dos principios*, sin relación aparente entre sí, para clasificar juicios fue un motivo de preocupación para KANT, el cual investigó cuidadosamente lo que ocurría cuando se aplicaban ambos principios a un mismo juicio. Para simplificar la cuestión, formemos un cuadro compuesto de dos columnas y dos filas, en el que las primeras designen la distinción lógica y las segundas la distinción epistemológica.

	Sintético	Analítico
a posteriori	*a*	*b*
a priori . .	*c*	*d*

Todo juicio debe encajar dentro de uno de los espacios *a*, *b*, *c* y *d*. Si no hubiera anotaciones en *b* ni en *c*, esto es, si la clasificación fuese diagonal, habríamos de concluir que los dos principios eran, si no idénticos, por lo menos indistinguibles en las aplicaciones; pero para KANT no era éste el caso: creyó que había anotaciones en todas las cuadrículas [10].

Las proposiciones espaciales, como el teorema referente a la suma de los ángulos de un triángulo, eran *juicios sintéticos a priori*, del tipo *c*; de ahí que nuestro conocimiento del espacio posea este mismo carácter de ser positivo y, sin embargo, no proceder de ninguna parte; y ésta es la premisa sobre la que KANT levanta la idealista tesis de que espacio y tiempo son formas de la intuición pura que la naturaleza de nuestras propias facultades de comprensión impone a la concepción.

Estas conclusiones son ya insostenibles, porque las distinciones presentadas en el cuadro anterior han experimentado importantes modificaciones. Por lo pronto, todavía puede mantenerse la división lógica, pero no con el absoluto carácter incisivo que se la concedía en tiempos de

[10] Para ser exactos, debemos hacer notar que el propio KANT consideraba *absurdos* los juicios del tipo *b*.

KANT: los lógicos y los científicos se han dado cuenta de la importancia de las definiciones a este respecto: la decisión acerca de la naturaleza analítica de una proposición determinada depende diacríticamente de cómo se definan los términos; pues si, siguiendo a POINCARÉ, consideramos las leyes de la naturaleza en gran parte como definiciones, la clase de las proposiciones analíticas de la ciencia es mucho más amplia de lo que sería si hubiéramos de seguir a PLANCK o a WHITEHEAD, para quienes tales leyes tienen un contenido sintético. Así, aunque la distinción lógica se ha hecho más fluida, los términos *analítico* y *sintético* conservan todavía un significado respetable.

No puede, sin embargo, decirse lo mismo respecto de la clasificación epistemológica: pocos científicos de nuestro tiempo le adscribirían ninguna importancia primordial. Como repetidamente hemos puesto ya de relieve, todo conocimiento se halla dentro de la experiencia, y, si bien debe mantenerse la distinción entre la experiencia inmediata y una especie más formal de ella, ambas se interpenetran en zonas comunes sin que exista una línea de separación; se hallan unidas, además, por un importante tipo de experiencia que denominamos aquí correspondencias, que no son ni inmediatas ni puramente formales. En resumen, pues, la dicotomía kantiana de lo *a priori* y lo *a posteriori* ha perdido su base en la ciencia actual, y no hemos de utilizar estas palabras en el sentido específico que las atribuía KANT. Es admisible, desde luego, conservar el cuadro y hacer diagonalmente las anotaciones; pero esto no es más que otra manera de decir que la distinción epistemológica concuerda con la lógica.

El contenido del párrafo 3 del texto de KANT antes reproducido refleja claramente los límites de los conocimientos geométricos del siglo XVIII: no se habían descubierto aún las geometrías no euclídeas, y la extravagancia de proclamar teoremas dotados de certeza apodíctica era natural a aquella época. Pero todo esto ha cambiado por completo, y podemos, por tanto, prescindir del examen de dicho párrafo en cuanto que expresa ideas que han resultado, de hecho, falsas en la actualidad.

En el párrafo 4 muestra KANT que el espacio no es un concepto universal en el sentido ordinario, un concepto que se halle "comprendido en" un número infinito de particulares, sino que posee un singular aspecto de infinitud enteramente propio: nos ofrece una intuición de infinito, no una serie infinita de ejemplos. De este modo llama la atención sobre una característica verdaderamente única del espacio y el tiempo, sumamente digna de que hagamos hincapié en ella; pero la atribuye al espacio de la experiencia inmediata —todo el espacio de KANT es el espacio de la percepción sensible—, mientras que hemos visto ya que esta potencialidad abstracta es un atributo del espacio conceptual solamente: las cualidades espaciales de la percepción no involucran infinitudes, y el espacio conceptual puede muy bien en realidad ser finito. De modo que si sustituyéramos la conclusión final de KANT por otra más moderada que

declarase que el espacio conceptual no se halla compuesto de experiencias inmediatas, sería plenamente aceptable.

El insuficiente comentario de las líneas precedentes no puede hacer justicia a la notable conjetura de KANT que sitúa el tiempo y el espacio como organizadores ideales del conocimiento: solamente podíamos esbozar aquí el fracaso de sus intentos de colocarse a la altura de los avances posteriormente realizados en ciertos campos en que originalmente se apoyaba. Nuestra conclusión es que esta concepción, grandiosa en su momento, no puede ya mantenerse: que el tiempo y el espacio tienen un *status* comparable al de todas las demás construcciones de la física; y tal vez se refuerce esta conclusión al combinarla con los ulteriores desarrollos contenidos en este libro.

Parece innecesario realizar una crítica detallada de las ideas de KANT sobre el tiempo, ya que son análogas a las anteriores, están expresadas en forma similar en la sección segunda del mismo capítulo sobre Estética Trascendental y suscitarían observaciones muy parecidas.

7.8. EINSTEIN Y MINKOWSKY

Es imperdonable omitir una figura tan importante como la de POINCARÉ de la presente exposición, pero nos proponemos volver con cierto detalle sobre él en otra ocasión; además, el lector habrá descubierto, sin duda, que el modo de razonar de POINCARÉ ha coloreado anónimamente gran parte de lo que antecede, y que con ello le hemos rendido ya homenaje. Prosiguiendo, por tanto, nuestro camino, dispongámonos a ver las ideas desarrolladas en la teoría de la relatividad, primero en la forma de la "teoría especial", en la que se verifica la fusión de espacio y tiempo en un continuo tetradimensional.

Cuando se las despoja de todo lo carente de importancia, las circunstancias que condujeron a esta fusión son realmente muy sencillas: se descubrió, siguiendo las predicciones de LORENTZ y EINSTEIN, que la longitud de los cuerpos rígidos es distinta cuando se la mide por un observador que se mueva respecto a dichos cuerpos y cuando la mide un observador que se encuentre en reposo respecto a ellos; y de modo análogo, los relojes resultan haber cambiado de ritmo cuando quienes efectúan las lecturas son observadores en movimiento. Estos son hechos empíricos que no están sujetos a interpretaciones metafísicas: son verdaderos y reales en todos los sentidos ordinarios de ambas palabras. Nada se gana ni se aclara insistiendo en que estos efectos, tan insólitos, son producidos o fingidos por nuevos métodos de medir longitudes y tiempos, ya que estos métodos no se han alterado esencialmente aunque se los haya perfeccionado; dicho de otro modo, a las reglas de correspondencia no les ha sucedido nada de importancia: unas experiencias nuevas, nos han obligado a modificar el entramado conceptual en que han sido incrustados el espacio y el tiempo.

Del lado matemático, la física solamente toma conocimiento de estos hechos en la formulación de la métrica. El elemento de línea ds, o, mejor, su cuadrado, ha incorporado unos coeficientes, g_{ik}, que son funciones de la velocidad de movimiento del observador con relación a las coordenadas medidas, dx_i; y, de la misma manera, el intervalo dt ha tenido que ser "transformado" al referirlo a un sistema en movimiento. Estas relaciones están expresadas por las llamadas fórmulas de transformación de EINSTEIN y LORENTZ; pero, posteriormente, MINKOWSKI señaló un interesante hecho matemático: observó que si el dt^2 transformado se multiplicaba por c^2 y se restaba luego del ds^2 transformado, la diferencia era independiente de la transformación, pues el cambio que se produce en ds^2 queda exactamente compensado por el cambio de $-c^2\,dt^2$; así pues, la cantidad $ds^2 - c^2\,dt^2$ es un *invariante.* (Aquí c es la velocidad de la luz).

¿Qué más natural en estas circunstancias que dar un nombre a esta diferencia? ¿Y cómo se la debería llamar? Supóngase que utilizamos el símbolo τ para *ict,* siendo que $i=\sqrt{-1}$, de modo que la diferencia en cuestión se convierte en $dx^2 + dy^2 + dz^2 + d\tau^2$; ahora bien, esto es exactamente lo mismo que el ds^2 euclidiano (véase la pág. 136) excepto por lo que se refiere al número de coordenadas, que es ahora cuatro y no tres. Si estamos dispuestos a considerar τ como una cuarta coordenada y $ds^2 - c^2\,dt^2$ como un elemento de línea generalizado a cuatro dimensiones, para el que podemos introducir el símbolo dS^2, no parece haber sucedido nada excesivamente extraordinario: el espacio continúa siendo euclídeo; conserva sus conocidas propiedades, tales como la homogeneidad y la isotropía; solamente se ha hecho más difícil —casi imposible— de visualizar.

Resistamos la tentación de pensar que este nuevo espacio es menos "real". Es una construcción interpretativa, desde luego, pero también lo era el espacio tridimensional y lo son muchos componentes de la realidad, como esperamos demostrar. La facilidad de intuición no constituye criterio importante de nada, ya que puede adquirirse merced al aprendizaje y presenta una amplia gama de variabilidad de persona a persona, como la tiene la visión del color: ya pueda o no el experto en relatividad aprender a representarse un espacio de cuatro dimensiones tan vívidamente como un espacio de tres, puede pensar tan clara y exactamente acerca de líneas universales (trayectorias tetradimensionales de puntos en movimiento) como puede hacerlo sobre complejas figuras geométricas. Y, a decir verdad, estamos realmente pensando en cuatro dimensiones cada vez que visualizamos un objeto que *se mueva en el espacio ordinario,* ya que tal intuición asocia al continuo del espacio tridimensional un cuarto grado de libertad, es decir, el tiempo.

Tampoco debe tomarse el continuo generalizado por más de lo que pretende ser. El "descubrimiento" de la cuarta coordenada no posee ningún aspecto misterioso ni provoca la aparición de fantasma alguno: es un descubrimiento en el sentido construyente que acabamos de estudiar. La cuarta coordenada es *imaginaria,* tal como los matemáticos utilizan

dicho término, y este uso lingüístico ha dado lugar en ocasiones a ridículos malentendidos en la mente popular, si bien carece, desde luego, de connotaciones que denigren la utilidad o la validez de la cuarta coordenada. Como ya hemos apuntado, nuestro universo posee muchas propiedades imaginarias y, sin embargo, de gran importancia: no consideramos, por ejemplo, que un circuito eléctrico inductivo sea menos real que uno resistivo por el hecho de que el primero tenga una conductividad imaginaria y el segundo una conductividad real.

El uso de una cuarta coordenada imaginaria no es algo que nos venga impuesto necesariamente: podemos muy bien elegir para este fin la propia t real. En ese caso, sin embargo, el coeficiente g_{44} no es 1 sino $-c^2$, y la fórmula para dS^2 indica que el espacio-tiempo resultante no es verdaderamente euclídeo. Los físicos utilizan ambas representaciones, pues son evidentemente equivalentes.

La unión de espacio y tiempo lograda con la nueva métrica es de gran transcendencia para al problema de la simultaneidad. Si NEWTON y KANT se hallaban en lo cierto nada espacial podría afectar al tiempo, la métrica de ds^2 sería independiente de t, y viceversa; así, el tiempo sería el mismo en todas partes, y un único instante abrazaría al universo entero. Pero según la teoría de la relatividad tiempo y espacio se hallan combinados, y la escala del tiempo depende del movimiento del observador. Al seguir los detalles del problema—bien sea mediante una consideración física de los cambios de intervalos y longitudes, bien mediante un análisis matemático basado en dS^2—se encuentra que es cierto lo siguiente:

Consideremos dos sucesos e_1 y e_2 que tengan lugar en dos puntos P_1 y P_2 en los instantes t_1 y t_2, y que sean registrados por dos observadores diferentes, O_1 y O_2, uno de los cuales se mueva con una determinada velocidad con relación al otro. Para hacer las cosas más impresionantes, podríamos suponer que e_1 y e_2 fuesen las explosiones respectivas de dos bombas atómicas, P_1 y P_2 dos ciudades, O_1 un observador situado en tierra y O_2 un observador emplazado en un avión a reacción. Se supone que todas las observaciones se realizan de la mejor manera posible, haciendo uso de destellos luminosos e introduciendo siempre la necesaria corrección por la velocidad finita de la luz. Consideremos primero el caso de que O_1 registre como simultáneas las dos explosiones; entonces, si P_1 y P_2 están muy próximos, también habrán sido simultáneas para O_2; pero si se hallan muy separados en el espacio y si O_2 vuela alejándose de P_1 y acercándose a P_2, e_2 será anterior a e_1; y si O_2 vuela en dirección contraria, e_2 será posterior. Inversamente, supongamos ahora que O_1 juzgue que los sucesos se hallan separados en el tiempo por un intervalo Δt; en general, también entonces se producirán en momentos distintos para O_2; pero si, no obstante, Δt es menor que el tiempo que necesitaría la luz para recorrer la distancia entre P_1 y P_2, el observador O_2 puede arreglárselas para hacer que los acontecimientos parezcan simultáneos eligiendo una velocidad de vuelo apropiada. Y esto último es lo que

el físico designa al decir que e_1 y e_2 han sido transformados a la simultaneidad. Se ve que el concepto de simultaneidad ha perdido su carácter universal: los sucesos simultáneos para un observador pueden no serlo para otro.

Lo que hemos descrito es, naturalmente, un "experimento mental", cuyos resultados se proclaman aquí como hechos; pues ni siquiera los cohetes más veloces son lo suficientemente rápidos como para hacer observables por medios ordinarios los efectos de que nos estamos ocupando. ¿Cómo, entonces, podemos estar tan seguros? Porque todas las demás conclusiones observables extraídas de la *métrica unificada* son empíricamente correctas: por la forma en que concuerda con todo lo demás que sabemos, y, como último motivo, aunque quizá no el menos importante, por su elegancia conceptual. Los clasicistas empedernidos insisten a veces en que nuestro cambio de actitud hacia la simultaneidad ha sido provocado *solamente* por el reconocimiento de que la luz, la más rápida de todas las señales, tiene una velocidad finita y que *si* se encontrara una señal capaz de velocidad infinita podría quedar restaurada la simultaneidad universal. Hemos de conceder todo eso. Pero si nuestro crítico prosigue hasta una conclusión que reduzca la versión restringida de la simultaneidad a un mero sucedáneo impuesto por la incapacidad que tenemos de encontrar la señal apropiada, de velocidad infinita —que, después de todo, es utilizable por el *pensamiento*—, entonces debemos oponernos; pues en tal caso estaría hablando como la niña que se preguntaba si sus alas, supuesto que las tuviese, serían blancas o azules: la simultaneidad universal es una construcción interpretativa perfectamente respetable, mas, al parecer, no válida.

Según la teoría de la relatividad, la idea de simultaneidad no ha perdido significado, pero se ha tornado algo más compleja; si bien conserva su antiguo significado para todos los observadores que se hallen en reposo uno respecto a otro, abarca más amplias relaciones en los sistemas móviles de referencia; y nos depara divertidas ocasiones de hacer reflexiones fantásticas basadas en la ciencia: una que no parece haber sido explotada como prueba de la inmortalidad es el hecho de que un alma que se alejara del cuerpo en el momento de la muerte a la velocidad de la luz observaría el último momento de agonía como una eternidad de felicidad o de tormento.

7.9. El espacio absoluto frente al relacional. Las dimensiones

Séanos permitido en este punto volver brevemente sobre la vieja cuestión del espacio absoluto frente al espacio relacional. Cabe plantearla de la forma siguiente: ¿existiría espacio si no existieran objetos? El positivista tal vez se niegue a contestarla, debido al carácter no comprobable del estado de cosas que se contempla en tal pregunta; pero nos parece, sin embargo, que la cuestión tiene sentido y que puede ser

contestada: el abogado del espacio absoluto basa su actitud en el simple hecho de que puede intuir el espacio tridimensional aun cuando se halle vacio de objetos; este tipo de espacio es una construcción interpretativa posible, que es absoluta dentro del marco de la pregunta inicial, pero no es el espacio que han adoptado los científicos: no es la clase de espacio que funciona como construcción interpretativa *válida* en vista de los requisitos expresados en los capítulos V y VI.

Estos requisitos no contienen un postulado de intuibilidad, y las secciones anteriores del presente capítulo han mostrado hasta qué punto las nociones del espacio aceptadas trascendían la simple visión de NEWTON. En nuestro estudio, la métrica ha constituido el centro focal, y ya hemos visto cómo un ligero cambio formal de sus propiedades rebasa con mucho los límites establecidos por la intuibilidad. Ahora bien, existe otra forma, no métrica, de abordar la idea del espacio, que permite hacer patente su carácter con mayor claridad aún. Es la basada en la teoría de grupos.

Un grupo es un conjunto de operaciones que han de realizarse sobre un objeto elegido de tal modo que, cuando se hayan realizado en sucesión varias operaciones, el resultado sea equivalente a una sola operación del grupo: es decir, cualquier conjunto de operaciones podrá quedar deshecho por alguna otra operación. Uno de los grupos más simples contiene dos operaciones, y podemos hacerlo visible mediante una actividad que nos es familiar: tirar de una cadenilla o un cordón conectado a una luz eléctrica. Las dos operaciones son: 1) no hacer nada; 2) tirar de la cuerda para iluminar la habitación. Es preciso considerar lo primero como una operación, que es preciso incluir para que las dos formen un grupo; y vamos a llamar elementos a estas operaciones. Cualquier sucesión del elemento 1 reproduce el elemento 1 (dejar la habitación a oscuras); cualquier número impar de aplicaciones del elemento 2 es equivalente al elemento 2 (iluminar la habitación); un número par de aplicaciones del elemento 2 es equivalente al elemento 1. Sobre la base de ésta y otras situaciones similares menos triviales se ha desarrollado un poderoso cálculo denominado teoría de grupos; el grupo es un conjunto muy especial de operaciones, y la mayoría de las actividades no forman grupo.

Si reemplazamos ahora el interruptor de la luz por un cuerpo rígido y las dos operaciones de no tirar y tirar por el conjunto infinito de todas las traslaciones y todas las rotaciones propias del cuerpo, obtenemos también un grupo. No sólo es esto interesante por sí mismo, sino que, además, el grupo resultante tiene las mismas propiedades abstractas que el espacio euclidiano tridimensional y suministra, por tanto, un instrumento para su estudio. SOPHUS LIE hizo de la teoría de grupos el fundamento de la geometría; POINCARÉ defendió este tipo de estudio y lo prefería al basado en la métrica; indicó también la forma en que las geometrías no euclidianas quedan engendradas por una aplicación de la teoría de grupos a cuerpos no rígidos.

Si el espacio es un grupo de operaciones sobre *cuerpos* queda resuelta la controversia entre los defensores del espacio absoluto y los del relacional: es claro que los primeros han perdido su causa. Este perece ser el veredicto de la física moderna.

La concepción que acabamos de formular afecta también al número de dimensiones que han de atribuirse al espacio. Aquí, una vez más, el geómetra que confía en la intuición "ve" la contestación, tres; pero en cuanto refrenamos nuestros instintos y procedemos abstractamente, aparece un resultado diferente: la relatividad condujo al uso de más de tres dimensiones, y otro tanto hace la teoría de grupos; porque sucede que las traslaciones y rotaciones de *dos* cuerpos rígidos forman también un grupo, grupo que corresponde a un espacio de seis dimensiones. Introduciendo más cuerpos puede aumentarse a discreción el número de dimensiones.

Mediante el estudio de la mecánica ordinaria, la ciencia de los cuerpos en movimiento, se llega a conclusiones parecidas a éstas. La complejidad de las relaciones entre un cuerpo y un sistema de coordenadas es menor que la existente entre dos cuerpos y un sistema de coordenadas. Ahora bien, el número de dimensiones del espacio que se necesita para una descripción de estas relaciones es el número mínimo de parámetros variables por medio de los cuales cabe especificarlas. Este hecho es lo que se refleja en la práctica del físico cuando describe sucesos en un espacio de cuatro dimensiones o el movimiento de n partículas en un espacio de $3n$ dimensiones. Y no es que se trate de una práctica reciente: los filósofos creen a veces que la multidimensionalidad es una característica nueva, quizá discutible, introducida por la relatividad, por la mecánica cuántica o por la mecánica ondulatoria; pero es tan antigua, por lo menos, como LAGRANGE, el cual publicó su famoso tratado sobre *Mécanique analytique* en 1788. Y no hay nada extraño ni que posea una dificultad inherente en la teoría de GIBBS de la mecánica estadística, que opera con espacios de fase de hasta 10^{24} dimensiones [11] y más.

7.10. LA CONTINUIDAD DEL ESPACIO Y EL TIEMPO

Las teorías físicas implican generalmente las diferenciales dx, dy, dz y dt, y su presencia nos hace recordar continuamente el carácter continuo del espacio y el tiempo. Sin embargo, no constituye prueba ninguna de continuidad, pues el físico se permite a menudo el uso de diferenciales para cantidades que sabe son discretas: en la mecánica estadística, el símbolo dN representa un número entero y sirve para denotar cierto número de partículas; y en los problemas eléctricos se utiliza dq para designar un elemento de carga, pese a nuestro conocimiento de la naturaleza cuántica de la electricidad. La justificación de tales procedimientos aparentemente paradójicos proviene de la pequeñez de dN con relación al número total de par-

[11] Véase el capítulo XIV.

tículas y de *dq* con relación a la carga total considerada. Por ello, si el *quantum* [12] de longitud y el *quantum* de tiempo fuesen pequeños en comparación con las longitudes y tiempos ordinarios, el fructífero uso de diferenciales podría no estar reñido con su existencia.

En tiempos recientes, el grado de complacencia en especulaciones de "hodones" y "cronones" discretos por parte de los físicos ha sido un índice de los fracasos de sus teorías. Se produjo un notable ejemplo de tal especulación tras presentar BOHR su teoría de los estados de energía cuantizados de los átomos: según la primitiva formulación de tal teoría, el electrón podía residir en unos llamados estados "estacionarios", y podía también saltar de un estado a otro; ahora bien, la teoría no proyectaba ninguna luz sobre estos saltos, y para salvarla se padeció la tentación de hacer retroceder más el misterio, de instalar oscuros intervalos en la escala del tiempo, intervalos durante los cuales quedaban suspendidas las leyes de la naturaleza. Afortunadamente, el callejón sin salida fue sólo temporal, y el tiempo continuo quedó restaurado en la teoría del comportamiento atómico de SCHRÖDINGER.

Digamos unas palabras acerca de las razones por las que los físicos se muestran a menudo tan reacios a aceptar la discontinuidad. Si hubiera de ser establecida como propiedad última del tiempo y del espacio, tendrían que verificarse uno u otro de dos drásticos cambios en la descripción teorética de la naturaleza: uno sería la refundición de todas las ecuaciones del movimiento en forma de ecuaciones entre diferencias en vez de ecuaciones diferenciales, cosa sumamente desagradable debido a las dificultades matemáticas que acompañan a la solución de aquellas ecuaciones; y la otra posible modificación implicaría la desaparición de las coordenadas del tiempo y el espacio de la descripción científica. Poco se sabe del posible éxito de semejante empresa, si bien HEISENBERG se ha convertido recientemente en eficaz defensor de ella, y ha desarrollado ya este problema a través de sus fases iniciales. Su teoría ejerce profundos efectos sobre toda la metodología de la ciencia, y la describiremos más adelante; pero antes es preciso examinar otra faceta de la cuestión continuidad-discontinuidad.

El espacio y el tiempo pueden ser discontinuos de dos formas diferentes. Pueden manifestar una discontinuidad fundamental en sus estructuras mismas o pueden funcionar como trasfondos continuos de sucesos discontinuos. La primera posibilidad está ejemplificada en las geometrías finitas [13] de VEBLEN y otros autores; mas, que nosotros sepamos, los físicos no las han considerado como posibles portadoras de la teoría, ni tampoco se nos ofrecen como probables candidatos.

---

[12] Se entiende por *quantum* o cuanto una cantidad irreductible, la longitud más pequeña posible, que ya no quepa seguir subdividiendo; su existencia haría discontinuo el espacio. Lo llamamos el *hodon* (del griedo *hodos,* ruta, camino) en analogía con la palabra *cronon* (del griego *cronos,* tiempo), que ya aparece en la bibliografía sobre el tema.

[13] Véase O. VEBLEN, y W. H. BUSSEY: *Trans. Am. Math. Soc.,* 7:241-259 (1906).

Lo que generalmente se tiene en cuenta en la física es la segunda posibilidad, un espacio-tiempo continuo de la forma descrita por MINKOWSKI, un agregado en el que los puntos están definidos en todas partes, pero en el que los acaecimientos forman un reticulado discontinuo; y siempre que hablamos de cuantización estamos pensando en esta cuasi-discontinuidad. Así, las energías se cuantizan sobre una escala ideal *continua* de energía: en realidad, la cuantización deja de tener significado cuando se destruye este telón de fondo. Los *cuantos* mismos varían continuamente de tamaño, siendo diferentes para un sistema físico y para otro. (Un fotón de frecuencia ν, por ejemplo, tiene una energía $h\nu$, y ν puede tener cualquier valor: h es la constante de PLANCK.) La situación cambia ligeramente cuando consideramos cargas eléctricas y momentos angulares: entonces encontramos solamente un *cuanto* básico (carga de electrón en un caso, $h/4\pi$ en el otro); pero también en este caso se piensa generalmente en él como en una cantidad extraída de o proyectada contra un continuo ideal (cuando el físico habla de distancia mínima y de intervalo mínimo temporal suele tener en las mientes esta idea). En esta inteligencia, volvamos a la cuestión del "hodon".

La propuesta de HEISENBERG [14] de una "longitud mínima" surgió a causa de ciertas dificultades de la electrodinámica cuántica. Trataremos de resumir brevemente los hechos pertinentes en tanto en cuanto se relacionen con el problema del espacio y el tiempo, y rogamos al lector que acepte aquí sin explicación unas cuantas cosas relativas a la mecánica cuántica, que esperamos aclarar más adelante. Hasta el momento todas las teorías acerca de átomos, núcleos y radiación habían arrancado desde puntos muy próximos a las líneas clásicas: de hecho, su primer paso había sido descubrir una "función hamiltoniana" (éste es un nombre propuesto para designar la energía del sistema a describir, expresado como función de impulsos y coordenadas generalizadas); y mediante las reglas de la mecánica cuántica, esta función se convertía luego en un "operador", para el que utilizaremos el símbolo H (un operador es una construcción matemática que, aplicada a una función, cambia esta última en una función diferente).

Ahora bien: la ecuación básica de la mecánica cuántica, que expresa cómo se altera el estado ψ de un sistema a medida que transcurre el tiempo, es la de SCHRÖDINGER [15],

$$H\psi = ih\frac{\partial\psi}{\partial t}$$

siendo h, una vez más, la constante de PLANCK. En la elección de H el físico goza de una libertad bastante amplia, y la ha ejercido sin restricciones; sin embargo, ha descubierto que toda elección razonable de H lleva a serias dificultades, ya que ciertas cantidades, como la energía de

[14] W. HEISENBERG: *Zeits. f. Phisik*, 120:513, 673 (1943).
[15] Véase la sección 17.8.

un solo electrón, la polarización del espacio vacío y varias otras resultan tener valores infinitos. Naturalmente, tales resultados no son tolerables, y señalan que las teorías que los predicen son defectuosas. Después de muchos estériles intentos, los físicos han terminado por preguntarse si no habría que abandonar, tal vez, el enfoque hamiltoniano y, por consiguiente, la ecuación arriba expresada. HEISENBERG responde afirmativamente y aduce como motivo la observación de que, según la ecuación de SCHRÖDINGER, H actúa como una derivada temporal; por ello, su uso supone cambios continuos de ψ en el tiempo: H sería inaplicable por ser t discontinuo (en nuestro segundo sentido).

La aportación positiva de HEISENBERG, aunque muy importante, no nos interesa aquí por el momento: elimina t del cuadro, introduce una nueva cantidad llamada matriz S en lugar de la hamiltoniana, demuestra evitar las famosas infinitudes y permite sacar algunas razonables conclusiones. Su destino final es incierto; pero la proposición de HEISENBERG contiene un punto más de gran interés: implica que no puede saberse nada acerca de la interacción de partículas a distancia muy pequeña; y la "longitud mínima", que él considera como una constante universal del mismo carácter básico que la carga de un electrón, entiende que es del orden de magnitud de 10^{-13} cms.; esto es, de dimensiones nucleares.

Otras teorías justifican la suposición de una longitud mínima en tanto en cuanto dejan de tener sentido cuando se aplican a regiones diminutas del espacio. La teoría de DIRAC de las partículas elementales, por ejemplo, predice un incomprensible movimiento oscilante de una amplitud de unos 10^{-13} cms., que se suele tomar como indicación del fracaso de la teoría; éste, pues, es el valor aproximado de lo que hemos denominado el hodon; y ocurre que es igual a la "longitud de onda de COMPTON", h/mc, siendo m la masa de la partícula.

El correspondiente cronon, el intervalo mínimo de tiempo, tendría que tener un orden de magnitud de 10^{-24} segundos. Hay dos maneras de llegar a esta conjetura. Primera, el tiempo mínimo en que el *cuanto* de longitud, ρ, puede ser recorrido es el que necesita para hacerlo la señal más rápida, es decir, la luz; y ese tiempo es ρ/c, siendo c la velocidad de la luz, lo cual da el valor expresado anteriormente. Segunda: podemos computar el período de la radiación emitida cuando se aniquila una partícula nuclear de masa m: debido a la relación de EINSTEIN entre la masa y la energía, la energía ínsita en esta masa es mc^2; pero, según la teoría de los *cuantos* esta energía es h/τ, siendo τ el período de la radiación en cuestión, y de ahí que $\tau=h/mc^2$; ahora bien, recordando que ρ es la llamada longitud de onda de COMPTON y que está dada por h/mc, llegamos al mismo valor que antes, $\tau=\rho/c$.

Estas consideraciones siguen siendo especulativas; sin embargo, sugieren que el tiempo y el espacio pueden perfectamente estar cuantizados en el segundo sentido expuesto anteriormente. Si la conjetura referente a los valores numéricos de sus *cuantos* es correcta, las medidas

ordinarias no se verán afectadas, ya que aquellos valores son demasiado pequeños para que podamos observarlos: en efecto, la mínima distancia actualmente susceptible de medición es el tamaño de un átomo, unos 10^{-8} cm, y el mínimo intervalo temporal mensurable es de 10^{-10} segundos.

7.11. La flecha del tiempo

El tiempo vuela hacia el futuro; ninguna elaboración científica, por profunda que sea, puede pasar por alto este hecho, que toda experiencia afirma innegablemente. Y no es que esto sea solamente cierto predicado de nuestra intuición inmediata del tiempo: el tiempo conceptual, en cuanto que se corresponde con la sensación, también es tiempo unidireccional.

Esto se olvida a menudo por tener en cuenta una notable, pero no decisiva cualidad del tiempo matemático: la de que es posible invertir el signo de t en las ecuaciones de la mecánica sin destruir su significado, y, en realidad, las ecuaciones con el signo de t invertido definen movimientos dinámicamente posibles. De esta circunstancia los físicos sacan a veces la conclusión de que el tiempo matemático es simétrico, o sea, un tiempo *bidireccional.* Pero al reflexionar sobre ello se aprecia la artificialidad de esta conclusión; pensando en el asunto experimenta uno, en cierto modo, el impulso de dar un puñetazo sobre la mesa y decir: pese a todo, el tiempo no se mueve hacia atrás: todo lo que los físicos pueden hacer es *leerlo* hacia atrás; también una línea impresa puede ser leída hacia atrás, pero esto no demuestra que tenga sentido cuando se la lea de este modo: ¿O sí?

Al llegar a este punto necesitamos una cuidadosa definición de los términos. Al analizarlos, se ve que en casi todos los estudios del problema de la direccionalidad están involucradas *dos* ideas que raras veces se dan por separado: la primera se refiere a la *unidireccionalidad* del tiempo, y la segunda a su *reversibilidad.* Vamos a explicar a continuación ambos términos.

Para hacer visible el significado de la unidireccionalidad comparamos el tiempo con el espacio de una manera sencilla y formal. Consideremos un espacio de dos dimensiones, una línea. Decimos: una línea tiene dos direcciones. Cuando sometemos a análisis esta proposición encontramos que su significado consiste en que podemos movernos a la derecha o a la izquierda, o que un cuerpo puede moverse desde un punto x_1 hasta otro x_2 y volver de nuevo a x_1; esto resume también el aserto de que las dos direcciones de una línea son *físicamente equivalentes.* Dicho más sucintamente: movamos una partícula de modo que se halle en los puntos x_1, x_2 y x_3 en tiempos t_1, t_2 y t_3, respectivamente; tenemos un espacio bidireccional porque puede satisfacerse el siguiente sencillo conjunto de condiciones:

$$x_3 = x_1 \qquad x_2 \neq x_1 \qquad t_1 < t_2 < t_3.$$

Tendríamos igualmente un tiempo bidireccional si pudieran satisfacerse las mismas condiciones con un intercambio de x y t:

$$t_3 = t_1 \qquad t_2 \neq t_1 \qquad x_1 < x_2 < x_3.$$

Mas es claro que esto es imposible, porque sería preciso que la partícula estuviese en dos lugares distintos en el mismo momento t_1; con lo cual hemos demostrado que existe una auténtica asimetría de la escala del tiempo, en contraste con la simetría del espacio. Asimismo hemos observado que esto dimana de los siguientes y sencillos hechos: un cuerpo puede estar en el mismo lugar en momentos diferentes, pero no puede estar al mismo tiempo en lugares distintos. Aquí es donde encontramos la esencia del carácter unidireccional del tiempo, y en este aspecto *es* diferente del espacio: sólo suponiendo que los objetos ocupen lugares distintos al mismo tiempo puede eliminarse esta diferencia entre espacio y tiempo.

La física moderna se acerca mucho a esta suposición, como ya hemos indicado y expondremos más extensamente en posteriores capítulos; pero hasta el momento se han empleado medios distintos de la negación de la unidireccionalidad del tiempo para regularizar las anomalías introducidas por la mecánica cuántica, y por ello es preciso seguir tomando el tiempo en el tradicional sentido unidireccional. Podemos enunciar sencillamente la conclusión actual a que llegamos de la siguiente manera: el tiempo no fluye en ambas direcciones a la vez. ¡Pero nada en el análisis hasta ahora efectuado impide al tiempo fluir uniformemente hacia atrás!

Se plantea aquí el problema de la *reversibilidad,* problema que exige una profundización mayor que la de las precedentes consideraciones, y que se presenta al preguntarse uno en qué difieren los *instantes* cuando todos los aspectos *espaciales* son idénticos. La cuestión puede formularse, por ejemplo, del siguiente modo: si en dos momentos distintos todas las propiedades del universo (esto es, todos los componentes de nuestra experiencia, incluyendo lo que podríamos llamar nuestro propio estado mental) fuesen exactamente idénticas, ¿no consideraríamos estos momentos como un idéntico instante? Esta es la cuestión crucial latente en las controversias sobre la reversibilidad del tiempo. Aunque, desde luego, posee un carácter académico, no se alinea en la misma categoría que la simultaneidad absoluta y otras situaciones científicamente imposibles, pues las leyes de la naturaleza no nos prohíben pensar en un universo recurrente.

Si juzgamos los dos instantes como uno solo, puede producirse una inversión del tiempo siempre que sea posible invertir los procesos del universo entero, con lo que el problema que nos ocupa resulta idéntico al problema físico de la *reversibilidad de los procesos naturales.* Nos proponemos examinarlo detenidamente más adelante; mas ya ahora hemos de observar que todas las leyes estrictamente mecánicas implican

reversibilidad, mientras que las leyes de la termodinámica no lo hacen. Negar la reversibilidad del tiempo equivale, por lo tanto, a aceptar la tesis de que la termodinámica es una ciencia por derecho propio, con leyes irreductibles; cosa que no puede decirse con absoluta certeza: en la actualidad ignoramos, simplemente, si éstas son completamente derivables de las leyes de la mecánica, ya que no se ha conseguido hasta el momento reducirlas a ellas [16].

Actualmente, pues, son perfectamente posibles dos puntos de vista opuestos. Uno, basado en la suposición de leyes mecánicas últimas, sostendría que el tiempo es reversible; ello implicaría que, si en cualquier instante quedasen invertidas las velocidades de todas las partículas del universo, reviviríamos hacia atrás nuestras experiencias. Esta idea, que, al parecer, sostiene G. N. LEWIS [17], no contradice a la primera conclusión a que hemos llegado con respecto al tiempo unidireccional, *excepto en el instante de la inversión,* instante evidentemente singularísimo en todos los sentidos. Pero si podemos reconciliarnos con la posibilidad de este fatal momento, la concepción de un tiempo reversible es enteramente sostenible sobre la premisa de la validez universal de las leyes mecánicas.

Por otra parte, la segunda ley de la termodinámica puede que no sea nunca derivable de las leyes de la mecánica (cosa que parece más probable a muchos físicos). Siempre habrá entonces algunos procesos que sigan en la misma dirección, y apoyándose en ellos como sobre un telón de fondo se podrá contar con un tiempo progrediente: aun cuando algunas partes del universo retornen a su primitivo estado, estos otros cambios señalarán, a modo de indicadores, el paso del tiempo irreversible. El aumento de entropía es un evidente cambio direccional sobre el que EDDINGTON [18] y muchos otros autores han centrado la atención en un esfuerzo por establecer de forma concluyente la irreversibilidad del tiempo; en cambio, invocar dos clases de tiempo, como hacía BERGSON, uno reversible, que desempeñaría su papel en los fenómenos del mundo inanimado, y otro irreversible, para uso biológico, es algo que ya no puede defenderse, pues no parece haber razón alguna para suponer dos tipos diferentes de ley en las dos esferas de investigación. Las leyes biológicas son, indudablemente, más complejas que muchas de las regularidades conocidas del mundo inorgánico y, al ser más complejas, es realmente posible que sean inaplicables a la mecánica, por la misma razón por la que las leyes de la estructura de los cristales son inaplicables a las solas moléculas; pero mantener una escisión radical y atribuirla a una dualidad de tiempos es menos plausible ahora que en tiempos de BERGSON.

La insistencia sobre el tiempo irreversible es muy intensa en el re-

---

[16] Véase en el capítulo XIV lo que decimos de la hipótesis ergódica.
[17] G. N. LEWIS: *Science,* 71:569 (1930).
[18] A. S. EDDINGTON: *The Nature of the Physical World,* Nueva York, The Macmillan Company, 1929 [vers. cast. cit.].

ciente libro de WIENER sobre los mecanismos de realimentación [19]; este autor siente que la ley estadística, tal como sabemos que opera en la termodinámica, tiene con mucho el más amplio radio de aplicación y es, por consiguiente, digna de un rango superior en la metodología de la ciencia: las leyes exactas, como las que regulan los movimientos astronómicos, deberían ser consideradas como excepciones a la regla, algo así como casos que formasen un conjunto de medida cero y, por lo tanto, sin interés. Pero el entusiasmo de WIENER por los agregados estadísticos y su habilidad en manipularlos han llevado demasiado lejos el juicio: después de todo, existen algunas leyes exactas en la mayor parte de la ciencia física. Desde el punto de vista de la estadística, su acción es un milagro, no obstante la proclamación cibernética de *nil mirari;* pero si se suponen leyes exactas la regularidad estadística *no* es un milagro, y ésta es la razón por la que el interés del filósofo en las leyes exactas persistirá pese a la preponderancia numérica de las regularidadas estadísticas.

Como ya hemos apuntado, mientras no sepamos si la termodinámica es una rama de la mecánica y si un principio como el de HAMILTON es aplicable a *todos* los constituyentes de la naturaleza, es imposible una decisión entre las tesis que sostienen que el tiempo es reversible y las que sostienen lo contrario. Si la segunda ley de la termodinámica es autónoma, como podría serlo, sólo es sostenible la segunda tesis. Que nosotros sepamos, el universo puede ser periódico, corriendo primero en una dirección y luego en otra, con lo que podría parecer como un acto de creación en cada extremo. Pero refrenemos aquí nuestra desbocada imaginación.

7.12. ¿SON INFINITOS EL ESPACIO Y EL TIEMPO?

Sobre esta cuestión, quizá la más interesante de todas, la ciencia no adopta, desgraciadamente, una postura resuelta y definida. La razón radica en las incertidumbres que rodean todavía la forma exacta de la métrica dS^2, pues la decisión en cuanto a la finitud del tiempo y el espacio ha de adoptarse mediante una apelación al pormenor de la estructura matemática de esta cantidad. Especificar dS^2, no es, como pretendía POINCARÉ, cuestión de conveniencia exclusivamente: EINSTEIN nos ha enseñado lo que se designa con la métrica correcta, y quedan muy pocas dudas en cuanto a que deberíamos reconocerla como correcta si se hallaran a nuestra disposición suficientes datos de observación. Estos datos son principalmente astronómicos y difíciles de obtener; y el hecho de ser deseables constituyó la motivación fundamental para la construcción del gran telescopio de Monte Palomar. De las formas hasta ahora propuestas en detalle para dS^2, quizá las más afortunadas implican un

[19] NORBERT WIENER: *Cybernetics,* Nueva York, John Wiley & Sons, Inc., 1948.

espacio-tiempo finito; algunas sugieren un espacio finito y un tiempo infinito; algunas son finitas en ambos componentes [20].

La métrica de MINKOWSKI que se utiliza en la teoría especial de la relatividad es infinita en ambos. Es satisfactoria a todos los efectos terrestres, y queda más próxima de la intuición habitual; mas parece seguro que fracasa en las regiones más remotas del universo, donde las galaxias despliegan su famoso movimiento de retroceso. Según algunas teorías, el espacio finito puede explicar la recesión de las nebulosas muy distantes.

Evitando todo detalle, nos limitaremos aquí a considerar las cuestiones tan frecuentemente planteadas: ¿qué se entiende por espacio finito?; si el espacio es finito, ¿qué hay más allá? El ejemplo de POINCARÉ servirá para contestarlas; lo hemos presentado en su forma bidimensional en la página 129; volvamos a él en tres dimensiones. Nuestro universo es entonces una gran esfera con una distribución radial de temperaturas, y $T=O$ en el límite; todos los objetos tienen tamaños proporcionales a T, y se supone que carecemos de todo sentido de temperatura, así como de la vista. (POINCARÉ se ocupa de la observación visual postulando una forma especial para el índice de refracción; nosotros hacemos caso omiso de esta complicación.) A medida que avanzamos hacia el límite, nuestros cuerpos, juntamente con los objetos que pasemos, se reducen de tamaño, pero nosotros seguimos en la ignorancia de tales cambios; en cuanto a la velocidad con que nos movemos, aunque aparentemente la misma, disminuye realmente, y nunca llegamos al límite. Si nos fiamos de las apariencias deberíamos llamar infinito a nuestro universo: desde luego, habría espacio más allá, pero ese espacio sería inaccesible para nosotros.

Otro ejemplo, debido a EINSTEIN, mostrará que el espacio puede ser finito y, sin embargo, no haber espacio más allá. Nos invita a considerar un círculo cuya circunferencia se halle infestada de criaturas que sólo tengan conocimiento de una dimensión, y que puedan moverse adelante y atrás (si bien las nociones de izquierda y derecha, de arriba y de abajo les serán desconocidas). Hagamos que el círculo sea muy grande o, si no, que no haya señal alguna indicadora para tales criaturas de si han estado o no anteriormente en un punto dado. Concluirán entonces, después de un prolongado reptar, que su mundo es infinito y se extiende en una sola dimensión.

Un animal perteneciente a un orden algo superior, capaz de conocer dos dimensiones, reconocerá el error cometido, y dirá a la criatura de una sola dimensión: tu espacio es finito, pero se halla curvado en dos dimensiones; tú lo ignoras, porque tus observaciones estaban confinadas a una sola dimensión. (Obsérvese que no existe ningún espacio unidimensional detrás del de las criaturas: el más allá es bidimensional y, por consiguiente, verdaderamente inaccesible para ellas.)

---

[20] Véase A. EINSTEIN: *The Meaning of Relativity*, Princeton de N. J., Princeton University Press, 1946 [vers. cast.: *El significado de la relatividad*, Buenos Aires, Espasa Calpe, 2.ª ed., 1952].

Pongamos ahora al animal de dos rumbos posibles sobre la superficie de una esfera tridimensional; en tales circunstancias concluirá que su espacio es infinito en dos dimensiones. Pero el hombre, con su superior sabiduría, le informa de que su espacio es realmente finito, pero curvado en tres dimensiones.

¿Quién dirá que el espacio tridimensional del hombre, tenido por él como infinito, no es finito pero curvado en cuatro dimensiones?

RESUMEN

El capítulo VII trata en primer lugar de varios de los problemas que se ocultan en la común aseveración de que las cosas reales tienen que existir en el tiempo y en el espacio. Al principio tenemos buen cuidado en disociar uno y otro de toda noción preconcebida de la realidad y de asignarles su lugar adecuado en la experiencia humana; descubrimos así que son construcciones interpretativas que hacen referencia a la Naturaleza a través de cierto número de reglas de correspondencia (sección 7.3). De hecho, el tiempo y el espacio son ligeramente más abstractos que muchas otras construcciones interpretativas científicas, ya que no poseen ninguna contrapartida inmediata en la percepción directa.

Para asentar esto hemos examinado y sometido a crítica varios argumentos tendentes a demostrar la existencia de un espacio absoluto en sí y por sí mismo a través de la intuición inmediata. La física moderna ha superado innegablemente a NEWTON y ha desautorizado el espacio y el tiempo absolutos.

Una vez considerada la distinción entre ingredientes perceptuales y construccionales de las ideas en cuestión, nuestro análisis estudia ambas clases, iluminando primero las formas en que se miden el espacio y el tiempo. Al estudiarlos surge inmediatamente la necesidad de procedimientos postulativos (construyentes), y esto conduce al análisis de los aspectos conceptuales del espacio y el tiempo (sección 7.6), lugar en que hemos explicado brevemente el papel desempeñado por la métrica en la geometría.

La epistemología de KANT fue una transcripción a términos filosóficos de los postulados de la física newtoniana. Por esa razón ha parecido necesario revisar y analizar con cierto detenimiento la doctrina kantiana de la estética trascendental y formular los pertinentes comentarios acerca de su creencia en la posibilidad de juicios sintéticos *a priori* (sección 7.7), Hemos consagrado las secciones restantes a detalles particulares de interés filosófico: están destinadas a poner de relieve una vez más la mezcla de elementos puramente postulativos en el significado científico del espacio y el tiempo, requisito indispensable para comprenderlo adecuadamente.

Hemos llamado primero la atención sobre la concepción relativista del espacio de cuatro dimensiones (MINKOWSKI), y luego sobre el papel

desempeñado por un número aún mayor de dimensiones en las teorías físicas. En la sección 7.10 se encuentran ciertos comentarios acerca de la continuidad del espacio y el tiempo, y en ella presentamos los hipotéticos "hodon" y "cronon". Pasamos revista, en particular, a los recientes argumentos de HEISENBERG que han conducido a la suposición de una longitud mínima del orden de 10^{-13} cm y a su introducción de la matriz S; hemos visto también que el cronon tiene un valor probable de 10^{-24} segundos.

Al considerar detenidamente el problema de la irreversibilidad descubrimos que implica dos cuestiones: ¿es el tiempo semejante al espacio en el sentido de poseer una completa simetría con respecto a las direcciones?; y ¿son reversibles en el tiempo los fenómenos? La primera pregunta es susceptible de ser contestada definitivamente, y ello en sentido negativo. La segunda ha recibido una gran variedad de respuestas, mas para discriminar definitivamente entre ellas habrá que esperar a que se pronuncie un veredicto sobre el tema de la ultimidad de las leyes naturales precisas (mecánicas) frente a las leyes estadísticas, veredicto que no se halla aún a nuestro alcance. Análogamente, no puede resolverse en la actualidad la cuestión referente a la finitud o infinitud del tiempo y el espacio, si bien la mayoría de las teorías cosmológicas se muestran favorables a un espacio finito. Hemos sometido a consideración, finalmente, la acostumbrada pregunta: si el espacio es finito, ¿qué hay más allá de sus límites?

BIBLIOGRAFIA

ALEXANDER, S.: *Space, Time and Deity,* Londres, Macmillan & Co., Ltd., 1934.

BENJAMIN, A. C.: *Introduction to the Philosophy of Science,* Nueva York, The Macmillan Company, 1937.

BERGMANN, P.: *Introduction to the Theory of Relativity,* Nueva York, Prentice-Hall Inc., 1946.

BERGSON, H.: *Time and Free Will,* Nueva York, The Macmillan Company, 1910.

BORN, M.: *Die Relativitäts Theorie Einsteins,* Berlín, Springer-Verlag, 1920 (exposición sencilla) [vers. cast.: *La teoría de la relatividad de Einstein,* Madrid, Rev. de Occ.].

CLEUGH, M. F.: *Time,* Londres, Methuen & Co., Ltd., 1937.

EDDINGTON, A. S.: *The Mathematical Theory of Relativity,* Londres, Cambridge University Press, 1930.

EINSTEIN, A.: *Relativity, The Special and General Theory,* Londres, Methuen & Co., Ltd., 1920 (obra de divulgación) [vers. cast.: *La teoría de la relatividad al alcance de todos,* Buenos Aires, Alda, 1946].

EULER, L.: "Réflexions sur l'espace et le temps", *Histoire de l'Academie des sciences et belles lettres de Berlin,* 1784.

Kant's Inaugural Dissertation and Early Writings on Space (traducida por J. Handyside), La Salle de Ill., The Open Court Publishing Company, 1929.

POINCARÉ, H.: *Foundations of Science,* Nueva York, Science Press, 1946.

REICHENBACH, H.: *Philosophie der Raum-Zeitlehre,* Berlín, Walter De Gruyter & Company, 1928.

SCHLICK, M.: *Space and Time in Contemporary Physics* (traducida por H. L. Brose), Nueva York, Oxford University Press, 1920.

WEYL, H.: *Phylosophy of Mathematics and Natural Science,* Princeton de N. J., Princeton University Press, 1949.

CAPITULO VIII

SISTEMAS, OBSERVABLES Y ESTADOS

8.1. La ciencia, ¿describe o explica?

Antes de abordar lo que es sustancial en el presente capítulo, cosa que haremos en la sección siguiente, vamos a considerar de modo sucinto la cuestión arriba enunciada, que estará molestándonos constantemente a lo largo de toda la tarea que tenemos que realizar si no la examinamos previamente, siquiera sea de un modo parcial.

Si la ciencia "describe" o "explica" los fenómenos es un problema que no estamos preparados para estudiar a fondo en este momento; haremos sólo, pues, unas cuantas observaciones preliminares a efectos de orientación. Para resolver el problema es preciso ante todo exponer *qué* es lo que ha de ser descrito o explicado. Puesto que nos ocupamos de la experiencia, y no de una presunta realidad, no se ha presentado todavía una ocasión decisiva para este examen; y es probable que su solución sea obvia cuando la realidad haya cristalizado a partir de las aguas madres de la experiencia.

Reservándonos, pues, un juicio definitivo sobre este problema, reconozcamos, sin embargo, que es legítima la distinción entre explicación y descripción en el razonamiento científico: de algunas teorías se dice, *de facto,* que describen, de otras que explican; las primeras suelen denominarse *fenomenológicas,* y las segundas *causales.* Ya nos hemos encontrado anteriormente con un género similar de división; o sea, la existente entre las teorías correlacionales y las exactas (o deductivas); y la diferencia de que ahora nos ocupamos podría, por razones de precisión, identificarse con ella. Pero esto violenta en cierto modo la insinuación de polaridad que entrañan las palabras *explicación* y *descripción,* y la identificación no es, de hecho, totalmente correcta.

Porque si bien es cierto que todas las ciencias correlacionales son descriptivas (aun cuando las correlaciones podrían establecerse entre factores que en otra interpretación fuesen susceptibles de ser considerados como causa y efecto), las ciencias exactas contienen también teorías que describen más que explican; como, por ejemplo, las siguientes:

a. Las leyes de Mendel de la genética eran deductivamente fértiles, y constituían una teoría matemática exacta, pese a sus numerosas imperfecciones. Sin embargo, difícilmente pueden ser consideradas como algo más que descriptivas.

b. En química, la teoría de los enlaces de valencia ocupa una posición análoga, excepto quizá en las mentes de las personas que se han habituado de tal modo al uso de enlaces que están dispuestas a dotar a los átomos de brazos que se extienden entre ellos. Tal vez no carezca de cierto interés este ejemplo por hacer visible el efecto de la familiaridad sobre la cuestión aquí tratada: hace veinte años, muchos químicos habrían defendido la teoría de los brazos de enlace como una *explicación* satisfactoria, porque se habían acostumbrado a pensar en ella como única y definitiva; hoy, en boga ya la teoría electrónica de la formación de enlaces, uno piensa en ella como una interesante aproximación *descriptiva* a la "verdad", que, según se concibe, radica en la reducción del problema a orbitales electrónicos.

c. También en física se proponen constantemente teorías como instrumentos fenomenológicos preliminares, con la esperanza de que faciliten el descubrimiento de explicaciones más adecuadas[1]. Por ejemplo: ahora se concede gran interés al comportamiento de ciertas substancias, principalmente los metales superconductores y el helio, a temperaturas muy bajas; ahora bien, aunque existen teorías que lo explican, teorías que han realizado predicciones cuantitativamente exactas, por implicar hipótesis *ad hoc,* esto es, presunciones especiales no derivables de otros campos conocidos, no pueden pretender, a juicio de sus autores, un *status* definitivo de explicaciones.

En contraste con las leyes descriptivas de MENDEL, se considera generalmente como una explicación la moderna teoría que sitúa los genes dentro de portadores materiales (los cromosomas). La razón más probable de ello consiste en que da respuesta a la pregunta de *por qué* se transmiten de determinadas maneras los caracteres hereditarios, mientras que las leyes de MENDEL ponen simplemente de manifiesto *cómo.* No parece necesario disertar largamente sobre la superficialidad de esta distinción, ya que está perfectamente claro que el por qué no es más que un cómo disfrazado: si el problema de la herencia fuese más sencillo y hubiéramos observado desde el principio cómo se van transmitiendo de generación en generación las partículas dotadas de propiedades específicas, es indudable que querríamos saber *por qué* había sucedido así, de modo que lo que ahora pasa por explicación sería entonces mera descripción.

Aunque pocos estarían dispuestos a admitirlo, el antropomorfismo se mezcla en la mayoría de los juicios referentes a qué es lo que constituye una explicación. La herencia es un ejemplo que presenta con bastante claridad esta característica: si quisiéramos cerciorarnos de que una determinada propiedad aparecía en un lugar determinado, tendríamos que poner allí algo que tenga o produzca esa propiedad, y no se nos alcanza

[1] En psicología la teoría de CLARK HULL de las "variables intermedias *o* interpuestas" parece ser el equivalente de las teorías físicas a que ahora nos referimos. Véase C. L. HULL: *Principles of Behavior,* Nueva York, Appleton-Century-Crofts, Inc., 1943.

cómo podría la naturaleza proceder de otra manera; de ahí nuestra satisfacción al encontrar genes localizables. Este antropomorfismo tiende a preferir los artefactos mecánicos y a considerar como tipo ideal una explicación mecánica. Como veremos en el capítulo X, la ciencia del electromagnetismo ha padecido, por efecto de este tendencia mecanicista, y es probable que su desarrollo se haya retrasado por causa de ella.

Si consideramos sin preconcepciones las dos fases explicativas de la herencia, no encontramos nada más que lo siguiente: un estadio es anterior al otro; históricamente, MENDEL fue anterior a MORGAN, el descubridor del gene, pero la teoría de MORGAN es lógicamente anterior a las leyes de MENDEL. Y lo que aquí nos interesa es la relación lógica, no la cronológica: la teoría de los genes es para nosotros una explicación porque cabe deducir de ella las leyes de MENDEL.

Resulta así que la distinción entre el cómo y el por qué es primariamente una distinción lógica; y, como tal, tiene un interesante corolario en la teoría del conocimiento, que permite tratar de otra manera el problema de "la descripción frente a la explicación". Hemos llamado anteriormente la atención sobre la variación en "distancia" de las construcciones interpretativas con respecto al plano de la percepción: hay conceptos que pueden ser relacionados con la Naturaleza mediante reglas muy obvias, y, en el otro extremo, puede haber otros completamente abstractos. Entendemos por teoría *descriptiva* la que entraña construcciones del primer tipo, mientras que la *explicación* implica una progresión ulterior en el terreno constructorio: explicamos yendo "más allá de los fenómenos".

Si la regresión desde lo inmediato es la característica de la explicación—ésta es la concepción que acabamos de formular—, la explicación nunca puede ser definitiva. Y tampoco es absoluta la distribución entre descripción y explicación; pues no siempre es cierto, como parece ser en el caso de la genética, que una teoría sea descriptiva y otra explicativa: en algunas ciencias encontramos más de dos fases de reducción lógica; cosa que, como era de esperar, es especialmente cierto respecto de los problemas que tienen una larga historia científica.

Uno de los ejemplos más sencillos lo constituye la gravitación. ARISTÓTELES ofreció una tesis, más bien descriptiva, según la cual un objeto terrestre caía porque buscaba su lugar natural; y la vamos a llamar primer estado de reducción. GALILEO formalizó y corrigió la suposición de ARISTÓTELES postulando (y, naturalmente, demostrando) que los cuerpos caen porque su aceleración es constante (segundo estadio). NEWTON generalizó y corrigió la teoría de GALILEO enunciando la ley de la gravitación *universal,* que sostiene que toda partícula atrae a toda otra partícula del universo con una fuerza inversamente proporcional al cuadrado de la distancia existente entre ellas (estadio número tres). En nuestros tiempos, EINSTEIN ha generalizado y corregido a NEWTON interpretando la fuerza de gravitación como vinculada a la métrica del espacio (estadio

cuarto). Y podemos estar seguros de que habrá nuevos y ulteriores estadios.

Tenemos aquí lo que parecen ser cuatro teorías diferentes, destinadas todas a permitir una comprensión de la misma experiencia perceptiva; ¿cuál de ellas describe y cuál explica? Diríamos que las hemos dispuesto en orden ascendente de exposición del por qué: los rasgos característicos (y es de presumir que acertados) del tercer estadio son derivables cuando se utiliza como premisa o postulado el cuarto; el estadio segundo es también deducible del tercero, y así sucesivamente. Es, desde luego, perfectamente propio del positivista decir que ninguno de ellos explica, sino que cada uno representa una fase de la descripción simbólica; sin embargo, solemos mantener, con razón, que existe una diferencia del tipo que hemos tratado de establecer. Mas la secuencia que conduce desde la descripción a la explicación es gradual e interminable.

No hemos preguntado cuál de las cuatro teorías era verdadera. No pueden ser todas exactas, porque se contradicen en los detalles. La mejor forma de expresar sus grados relativos de validez es decir que cada una de las tres primeras es una aproximación a la cuarta y que la aproximación aumenta de estadio a estadio. (Estamos suponiendo aquí, tal vez erróneamente, que la teoría de EINSTEIN cuenta con el apoyo de las actuales observaciones, cosa que no ha quedado asentada a satisfacción de todos.) Podemos también enunciar la cuestión de un modo más llamativo en la forma siguiente: la teoría de ARISTÓTELES se tornó falsa al aceptarse la de GALILEO, y a la teoría de NEWTON le ocurrió lo mismo cuando se aceptó la de EINSTEIN; y esta última, con las reservas expresadas entre paréntesis más arriba, es ahora verdadera o válida, aunque existen pocas probabilidades de que permanezca verdadera eternamente. Pero, después de todo, ¿por qué había de ser la verdad científica un concepto estático?

8.2. EL ENTRAMADO DE LA DESCRIPCIÓN FÍSICA

El esbozo que hemos trazado del proceso científico por las anchas brechas de la experiencia racional e inmediata, salvadas por las reglas de correspondencia, es demasiado tosco para servirnos de guía local entre las diversas teorías de la física. Vamos a ofrecer ahora mapas más detallados para territorios especiales; estos mapas deben mostrar racimos de construcciones interpretativas, desde los cuales se extiendan ciertas correlaciones epistémicas hasta las experiencias particulares.

No puede ofrecerse ninguna fórmula singular que unifique cada racimo. En realidad, toda tentativa de hacer aparecer a la ciencia como una trama uniforme de eso que se llaman "hechos" tiene que parecer artificial cuando se le juzgue teniendo en cuenta la fundamental diversidad de los modos de descripción, no sólo en las diferentes ciencias, sino incluso en una única ciencia madura como es la física. La unidad exis-

tente surge de la forma en que estos hechos se asientan y, lo que es más importante, también de cómo encajan en cierto designio peculiar del proceso cognoscitivo. Cuando fijamos cuidadosamente la mirada en este proceso podemos percibir un esquema general de descripción que sirve para todo el conjunto de la ciencia, y las observaciones siguientes tratan de que caigamos en la cuenta de ello.

Las características que destacan en un mapa topológico son montañas, ríos y ciudades: hacerles resaltar aumenta la claridad y, sin embargo, deja sitio a una gran variedad de otras características. Del mismo modo, vamos a representar cierto número de teorías con la ayuda de una pauta en la que aparecen claramente tres elementos cardinales, los *sistemas,* los *observables* y los *estados,* pero sin que ello redunde en perjuicio de un fértil entresijo de construcciones interpretativas secundarias que proporcionan vitalidad a tal pauta y transforman cada teoría en una empresa en evolución.

El descubrimiento científico es un refinamiento de la percepción ordinaria y es de esperar que dentro de las formas más toscas de conocimiento encontremos los prototipos de formas superiores. Veamos, entonces, cómo nos representamos lo que nos transmiten las simples sensaciones. Percibimos, por ejemplo, un complejo de colores, formas y movimientos, mezclados con cierta fragancia y quizá con datos táctiles, todo empapado de cierta conciencia de "ahí fuera"; toda la experiencia se resume en la declaración: esto es una flor. El "ahí fuera", que es parte de la sensación que conduce al concepto del espacio, es simplemente la conciencia cinestésica prolongada de que dando otro paso o desplazándonos de alguna otra manera podríamos lograr que la flor nos estuviese próxima. Así, en virtud de una regla de correspondencia en gran medida no analizada, trascendemos el reino de lo inmediato y elaboramos o construimos el objeto externo flor. La postulación de un *objeto externo* es la primera fase del acto cognoscitivo.

Los objetos externos forman el ejemplo más sencillo y menos complicado de una clase de entidades constructorias a las que vamos a aplicar el nombre de sistemas físicos, o, abreviadamente, de *sistemas.* Desde este punto de vista, un objeto externo sirve de portador de propiedades observables, tales como color, olor, energía, momento angular, etc.; y a toda construcción interpretativa que, como sucede con los objetos externos, funcione en este sustantivo papel como portador de propiedades observables la llamaremos en adelante sistema. Veamos unos ejemplos de sistemas que interesan al físico: puntos materiales (con las propiedades de masa, posición, velocidad, etc.), campos eléctricos (con las propiedades de intensidad del campo, potencial, derivadas de la intensidad del campo, etc.), electrones (con las propiedades de masa, carga, tamaño, etcétera) y fotones (con las propiedades de energía, impulso, frecuencia, etc.). Diremos a veces, aunque ello sea un tanto vago e impreciso, que los sistemas se hallan en una relación adjetiva con sus propiedades observables.

Las llamadas propiedades son construcciones interpretativas, no elementos del campo *P* (aunque frecuentemente se hallen muy cerca de él), pues se unen a la sensación mediante reglas de correspondencia propias. Esto es perfectamente evidente en los ejemplos físicos citados, pero lo es mucho menos en el caso de un sistema tan simple como el constituido por un objeto ordinario. Debe reconocerse, sin embargo, que la propiedad *azul,* con la que investimos a una flor ordinaria, es distinta de la sensación que yo tengo de ella en un acto concreto de percepción. La construcción interpretativa *azul* puede estar relacionada muy estrechamente con el azul percibido, puede ser la reproducción de este último en la memoria o en la imaginación, provista de la cualidad de persistencia, pero no es el azul espontáneo, incomunicable, rapsódico, el que se ve. Así, pues, al atribuir propiedades a los sistemas permanecemos dentro del campo *C* sin que se introduzca la confusión en nuestro discurso.

Las precedentes consideraciones violentan, probablemente, la psicología de la percepción. Pues difícilmente puede afirmarse que sea cierto que al ver una flor, cosifiquemos primero esa entidad y le atribuyamos luego propiedades; tal proceso parece producirse más bien el revés: primero se postulan las propiedades y luego éstas determinan de la manera que sea una construcción interpretativa sustantiva. Ciertamente puede concederse todo esto sin necesidad de modificar las precedentes observaciones ni la terminología que establecen.

Pero es necesario obrar con cautela en un aspecto: es preciso esclarecer lo que sea la llamada relación adjetiva, pues lo que en los sencillos ejemplos del sentido común aparece como evidente e incuestionable atribución de propiedades a los sistemas puede ser un acto más complejo y deliberado al nivel del procedimiento científico. Volveremos dentro de un momento sobre esta contingencia.

Sería gratuito, naturalmente, seguir en esta etapa un método de análisis que la ciencia ha proclamado repetidas veces como peculiarmente suyo: nos referimos a la versión acrítica del proceso de conocer que comienza con un objeto físico, lo hace reflejar rayos de luz que son refractados por las lentes de nuestros ojos y, finalmente, termina con un estímulo sobre nuestra retina para activar allí los impulsos de la neurona y una sensación final en nuestro cerebro. Semejante análisis, si bien puede ser completamente exacto como versión científica final de ciertos tipos de experiencia, confunde el principio con el final del proceso de conocer y da por sentado el *status* ontológico de unas construcciones interpretativas cuya génesis es lo que ahora está en cuestión. Volvemos, por tanto, a la situación epistemológica que hemos comenzado a describir.

¿Cuántas propiedades posee una flor? La plenitud de la experiencia inmediata deja indefinido su número: no puede trazarse ningún límite a la investigación exploratoria; sin embargo, un número finito basta para identificar al objeto en cuestión como una flor. Este crucial conjunto de propiedades, seleccionadas de entre un número infinito, es suficiente para inducirnos a aplicar el término *flor* a la experiencia de ellas, de las cuales

muchas cambian con el tiempo (tales el color y el tamaño), y una combinación de éstas nos permite especificar un *estado* de la flor en un momento dado. Las propiedades cambiantes, en tanto en cuanto tienen interés para la ciencia, son *mensurables* y, por consiguiente, enunciables en forma de números; cuando las propiedades han alcanzado este grado de definición se les suele llamar *magnitudes* (terminología que vamos a adoptar aquí).

La mente popular concede a la medición una importancia fundamental para la ciencia, importancia que a veces se exagera un poco. Debe hacerse notar que sólo las propiedades pueden ser medidas: la flor misma, como objeto de experiencia, no es mensurable, sino que es el portador de cierto número de magnitudes. Del mismo modo, la ciencia en sus etapas superiores, atribuye magnitudes mensurables a entidades no mensurables, y es erróneo decir que la ciencia limita su interés a relaciones mensurables: un átomo, por ejemplo, es intrínsecamente inmensurable, pero tiene magnitudes que pueden ser cuantificadas. (Es difícil decidir si las propiedades son jamás intrínsecamente inmensurables, pues ha resultado generalmente cierto que la ciencia, una vez despertado su interés en una cualidad dada, ha encontrado también medios de medirla. Sin embargo, la belleza de una flor, por ejemplo, no se ha sometido a medición hasta el momento, y esto explica, entre otras cosas, el hecho de que la estética no forme parte de la ciencia.)

Un análisis a fondo de este tipo, cuando se realiza con referencia a la experiencia ordinaria, parece desafortunado y pedante: es como instalar un mortero de 25 centímetros para cazar gorriones. Nos ha parecido, sin embargo, conveniente incluirlo porque proporciona un elemento de continuidad desde la sensación ordinaria hasta la descripción científica y porque ilustra el uso que hacemos de los términos pertinentes. En realidad, nos proponemos fijarnos también en otra distinción que puede parecer al principio igualmente forzada, pero que después resultará tener un interés decisivo.

Los objetos entran en la experiencia reflexiva con lo que hemos denominado papel sustantivo, y las propiedades se adhieren a ellos mediante relaciones adjetivas. Vamos a someter a continuación a un atento examen el significado preciso de estas últimas. Las palabras resultan un tanto ambiguas para expresarlas: permiten que la simple proposición inespecífica ("locución descriptiva" de B. RUSELL) *la flor azul* se transcriba en *la flor tiene color "azul"*. Las dos declaraciones significan, desde luego, la misma cosa, pero en esta transición se produce un mejoramiento apenas observado de un adjetivo incidental en algo *poseído* por el objeto con cierta especie de continuo y continuado dominio; esto es algo más de lo que la mera sensación autoriza, pues la flor es azul solamente cuando es percibida. El lector tiene derecho a saber por qué insistimos en esto con obstinación aparentemente neurótica; es porque la física moderna es incomprensible a menos que se reconozca este hecho.

En el plano de la percepción ordinaria no hay ningún mal en suponer

que la atribución de propiedades revista un carácter posesivo. Sin embargo, si quisiéramos ser perfectamente exactos deberíamos decir: la flor queda investida de un *observable* llamado color; no tiene este color en todo momento, sino que lo produce cuando se la mira: el observable es una especie de cualidad abstracta asignada como atributo latente a los objetos; se llena de alguna manera de contenido en los instantes de observación. No hay necesidad alguna de este más cuidadoso enunciado, sin duda, en casos como el presente, donde el observable produce invariablemente el mismo contenido específico, azul; pero si la misma flor fuese a veces amarilla y a veces roja en una serie de observaciones consecutivas, se haría efectivamente necesaria la interposición de un abstracto receptáculo de posibles propiedades, llamado observable, para ser llenado de observaciones específicas, y la relación posesiva sería falsa. Los objetos atómicos y subatómicos son como una flor que cambiase de aspecto al mirarla repetidas veces: los observables asumen diferentes valores en ocasiones diferentes y son, sin embargo, en otro sentido, únicos. Vemos que sólo cuando las propiedades son relativamente invariables podemos decir que el objeto las posea: en otro caso es preciso atribuirlas como observables, cuyos valores aparecen en la observación. Es como si la flor tuviese un color latente, desde luego, pero como si su color, que sería una mera posibilidad, adquiriese un valor definido solamente en virtud de una *interacción* con un observador. En la teoría de los *cuantos,* la posición de una partícula es un observable de este tipo: en general, no puede asignársele un valor numérico único.

Resumiendo esta cuestión, que, cierto es, no deja de resultarnos poco familiar: hemos reconocido la necesidad de refinar la usual interpretación de una relación adjetiva. Esta es la relación entre un sistema y un observable; pues bien, o los observables pueden ser *poseídos* como propiedad, o pueden ser *latentes:* en el primer caso podemos permitirnos llamar al observable una magnitud en el sentido ordinario, y en el segundo hablamos de observables latentes. Cuando sea necesario poner de relieve esta diferencia, utilizaremos los nombres observable-propiedad para uno y observable latente para el otro.

La física clásica es una rama de la ciencia en la que la incapacidad de distinguir entre propiedades y observables no es fatal para su filosofía, en la que la atribución posesiva de magnitudes a los objetos no suscita ninguna dificultad práctica. Tiene tres ramas importantes: mecánica, electrodinámica y termodinámica[2], a las que vamos a prestar atención ahora. En cada una de ellas discerniremos objetos físicos con observables-propiedad. Pero los objetos físicos no son necesariamente de la sencilla especie hasta ahora considerada: pueden ser también cosas tan inaprehensibles como los campos gravitatorios o los electromagnéticos; funcionan siempre, sin embargo, como portadores de observables y no son mensu-

[2] La acústica y la óptica son, desde luego, partes de la mecánica y la electrodinámica, respectivamente, en sentido amplio.

rables; los llamaremos *sistemas*. Sus observables-propiedad cambian en el tiempo: por estar más alejados de la percepción inmediata que la flor de nuestro ejemplo, sus propiedades no suelen gozar de la riqueza de la propia experiencia intuitiva, y el número de propiedades significativas puede ser pequeño. Es posible combinar cierto número de observables, tales como el número de estambres y pistilos, el color, la forma y la composición de los pétalos, de modo que formen un *estado* de la flor, estado que se visualiza prontamente en este ejemplo; pero cuando los observables son latentes, como ocurre en el caso del electrón, su composición puede producir un estado sumamente abstracto y no representable en forma visual, como veremos más adelante.

En la percepción simple no se suele sentir gran interés por la cuestión de cómo forman un estado muchas propiedades: son consideraciones prácticas las que deciden cuándo hemos mirado lo suficiente para saber que el objeto situado ante nosotros es una flor en una determinada etapa de lozanía. En problemas más intrincados de la ciencia, sin embargo, donde falta el pleno trasfondo de referencia intuitiva, se hace preciso determinar exactamente qué observables y en qué número se eligen para definir un estado; para hacerlo hay que invocar criterios de suficiencia, pero éstos se explican mejor por medio de ejemplos. Me temo que nos hemos excedido ya (en lo que pretendía inocentemente ser una introducción general a los problemas de la descripción científica) recargando el examen preliminar con gran parte de la acción y otra tanta de su significado.

Resumen

Cuando las teorías de la ciencia involucran construcciones interpretativas que se hallan próximas al plano de la percepción, se dice que son descriptivas o fenomenológicas; cuando penetran más profundamente en el reino constructorio se dice que proporcionan explicaciones; pero no existe diferencia intrínseca alguna entre descripción y explicación científicas. Hemos hecho visibles estos extremos con referencia a las teorías *físicas* que tratan de la gravitación.

Hay un esquema general que penetra toda descripción o explicación física: el proceso epistemológico comienza generalmente con la construcción de *sistemas físicos* (partículas, ondas, campos electromagnéticos...; en general, cualquier objeto externo es un sistema físico en sentido amplio) que sirven de portadores de ciertas propiedades. Las propiedades de interés para la ciencia reciben el nombre de *observables (v. gr.,* entre los observables de una partícula figuran su masa, posición, velocidad, energía, posiblemente su color, olor, etc.)[3]. Para comprender la física atómica es completamente esencial que *no* consideremos los ob-

[3] Podemos considerar la aposición sistema-observable como versión moderna de la relación metafísica de Aristóteles substancia-predicable.

servables como simplemente poseídos por sistemas ni permanentemente atribuidos a ellos: así se introduce el concepto de observables latentes, en el que se funda toda la teoría de la mecánica cuántica.

Finalmente, se elige cierto conjunto de observables a efectos de explicar o describir la naturaleza del sistema, conjunto del que se dice que define el *estado* del sistema. Las razones que hay para elegir un grupo determinado de observables, y no todos ellos, al formular un estado, las estudiaremos en capítulos posteriores, principalmente en el XIX.

BIBLIOGRAFIA

CASSIRER, E.: *Determinismus und Indeterminismus in der modernen Physik*, Goeteborg, 1937.

CASSIRER, E.: *Substance and Function*, La Salle de Ill., Te Open Court Publishing Company, 1923.

DIRAC, P. A. M.: *The Principles of Quantum Mechanics*, 3.ª ed., Nueva York, Oxford University Press, 1947.

MARGENAU, H.: "Methodology of Modern Physics", *Phil. Sci.*, 2:48, 164 (1935).

CAPITULO IX

LA FISICA DE LOS SISTEMAS DISCRETOS

9.1. El método de la mecánica

La mecánica, llamada vagamente a veces la ciencia del movimiento, es una disciplina que versa sobre toda experiencia que pueda ser representada y comprendida con el uso de tres clases de *sistemas:* 1) puntos materiales o masas puntuales (más imprecisamente llamados partículas), o conjuntos de ellos; 2) cuerpos rígidos, y 3) medios materiales deformables y continuos. Por consiguiente, el tema se subdivide en tres amplias ramas: mecánica del punto, mecánica de los cuerpos rígidos y mecánica de las medios continuos. Cierto es, desde luego, que estos sistemas suelen estudiarse en movimiento, pero las condiciones en que se encuentran en reposo son tan importantes como lo es la descripción de su movimiento. Nos vamos a ocupar sucesivamente de los tres temas; y es preciso asignar al primero la mayor parte del espacio de que disponemos, ya que prepara la escena para los otros dos, por utilizarse en estos otros muchos de los principios de la mecánica del punto.

Una masa puntual, punto material o partícula, es una idealización muy cómoda que puede ponerse en correspondencia con gran parte de nuestra experiencia. En la práctica olvidamos a menudo su carácter idealizado y lo consideramos como un objeto en el sentido usual, como una piedra o una flor; es realmente uno de los sistemas más palmarios de toda la ciencia, y está situado en el campo C muy cerca del plano P (cf. la figura 6.1). De la infinita variedad de propiedades (posición, color, olor, sabor, composición química quizá) que podrían atribuírsele, la mecánica elige un conjunto muy limitado para considerarlo dotado de interés científico: un punto material tiene una propiedad intrínseca que nunca cambia (no nos interesa por el momento la modificación relativista de la mecánica del punto), que es su *masa;* y posee además *posición* y *velocidad.* Si la partícula no está limitada en lo que a movimiento se refiere, cada una de estas últimas ha de quedar dividida en tres propiedades individuales o componentes: la posición, en las tres coordenadas, x, y, z, medidas a partir de un determinado origen, y la velocidad, en sus componentes v_x, v_y, v_z. En último análisis, pues, el número de propiedades significativas es de siete.

Es posible, y a menudo conveniente, reducir en uno ese número. Esto se logra inventando una combinación de masa y velocidad, llamada

impulso, cantidad de movimiento o ímpetu; al igual que la velocidad, éste es un vector con tres componentes: $p_x=mv_x$, etc., siendo m la masa de la partícula. Utilizaremos en adelante este esquema más sencillo y trabajaremos con impulsos en vez de hacerlo con velocidades.

Se dice que una partícula tiene tres grados de libertad. Estos representan el mínimo número de coordenadas a base de las cuales puede enunciarse la posición del punto material, y constituyen un número fijo, independiente de la elección de coordenadas. Es decir, en las coordenadas rectangulares los tres números que se necesitan son x, y, z; en coordenadas esféricas son r, θ, φ, y así sucesivamente, tres en cada sistema. Este es el número mínimo porque la posición podría también ser registrada dando x, y, r y θ, uno de los cuales es superfluo. Si una partícula se mueve en un plano tiene dos grados de libertad; y sobre una línea tiene solamente uno; por ello puede parecer que el número de grados de libertad es idéntico al de dimensiones del espacio en que se mueva el punto material (error bastante corriente); pero si el punto se mueve a lo largo de una curva predeterminada que ondule en el espacio como una montaña rusa, su movimiento se desarrolla en tres dimensiones y, sin embargo, tiene solamente un grado de libertad, ya que sólo se necesitaría una coordenada, a saber: la distancia desde su punto de partida, para indicar dónde está. Por consiguiente, observamos que movimiento con un grado de libertad no es lo mismo que movimiento en una dimensión y sigue, en general, leyes completamente diferentes.

Volviendo ahora a las seis propiedades significativas de todo punto material, observamos que son poseídas, no atribuidas como observables latentes. Suponemos un grado de coherencia en el comportamiento de la partícula que nos permitirá por lo menos esperar lo siguiente: cualquiera que sea la forma en que se mueva el punto, si en un intervalo de tiempo muy pequeño se realiza cierto número de observaciones acerca de su posición y de su impulso, todas rendirán casi los mismos valores de x, los mismos valores para y, para z y también para cada una de las componentes del impulso. Naturalmente, le está perfectamente bien a la partícula que estos valores cambien en el tiempo, como ocurre cuando se halla en movimiento, pero ahora pedimos que estas observaciones se hagan en un intervalo tan corto que su progresión haya sido despreciable o, si parece más plausible al lector, que muchos observadores tomen nota de las propiedades al mismo tiempo. En este último caso, todos ellos darán cuenta de los mismos valores; después de todo, las partículas reales de tamaño visible se comportan de esta coherente manera.

Las seis propiedades de que estamos hablando forman un *estado* del sistema. Pero, ¿por qué? Si no vamos a incluir el olor y el sabor de nuestra partícula quizá no debiera uno ser tan meticuloso como para incluir el impulso, pues a primera vista parece que su sola posición bastaría. Para ver la contestación es preciso explorar más hondamente en el método científico. Porque sucede que no es suficiente un conocimiento

tan sólo de su posición actual para predecir las posiciones futuras o pasadas de la partícula: el conocimiento de la posición, el impulso y el olor es demasiado, y el de las seis propiedades en cuestión es justamente suficiente.

Quiere decirse con esto que se han descubierto *leyes* que son autosuficientes con respecto a los estados definidos en relación a estas seis cantidades: sin tales leyes no se habría evidenciado la suficiencia. Veremos en seguida cómo funcionan las leyes mecánicas, mas parece oportuno destacar antes la interacción entre estados y leyes: los estados pueden ser definidos de muchas maneras, y para que sean significativas, las cantidades que componen un estado deben elegirse de modo que se disponga de unas leyes que sirvan de intermediario perfecto entre ellas en diferentes instantes. Esta aparente regresión, esta peculiar interdependencia que no permite se acepte como significativo ningún estado antes de que sean conocidas las leyes que lo regulen y que ninguna ley sea declarada válida antes de que los estados hayan sido definidos, hace extremadamente difícil el comienzo de toda ciencia; lo convierte, en realidad, en una obra de auténtico genio. Si no fuera por este dilema, cualquier campo del conocimiento podría ser convertido en una ciencia exacta mediante estados exactamente definidores.

Para ver más claramente cómo funciona todo el esquema vamos a estudiar los detalles de la teoría newtoniana de la mecánica del punto.

9.2. La mecánica de Newton

Por lo que afecta al movimiento de una sola partícula, la teoría de Newton se resume en lo que se denomina su segunda ley:

$$m\frac{dv}{dt}=F(x) \tag{9.1}$$

Al escribirla tan sencillamente estamos aplicándola a una partícula que se mueva en una sola dimensión, la dirección x, cosa que es satisfactoria para los efectos que ahora nos ocupan; y estamos volviendo también a los estados originales, formados por una posición y una velocidad. Tenemos aquí, además de la propiedad fija m, un grupo reducido de dos magnitudes variables, x y v (siendo esta última dx/dt); en cuanto a la función F, cuyo argumento es la posición de la partícula, recibe el nombre de fuerza, y la suponemos dada.

La ecuación que hemos escrito es una ley típica de la naturaleza: es una ecuación diferencial en la que la variable independiente es el tiempo, pero éste no aparece *explícitamente* en la ley, sino que solamente entra a través de la derivada. En cambio, sí aparecen las variables de estado, x y v. Por consiguiente, esta ley de la naturaleza no dice en detalle lo que ocurre: presenta una relación de procesos algo así como *in nuce*, pues es preciso resolver la ley para que resulte explícita. La solución

de la ecuación diferencial es de la forma $x=f(x_1, v_1, t)$, y a ella es a la que llamaremos *ecuación* del movimiento.

La ley del movimiento es en este caso una ecuación diferencial ordinaria de segundo orden en x y t. Como es bien sabido, la solución de tal ecuación introduce dos constantes de integración que pueden considerarse como el valor de x y el de su derivada en un instante fijo arbitrario, t_1; vamos a denotarlas respectivamente por x_1 y v_1, que aparecerán como parámetros en la ecuación del movimiento; y ha de recordarse que sólo es posible llegar a una interpretación cuando ambas estén dadas. Vemos, pues, cómo decide la ley qué número de magnitudes es necesario y suficiente para la definición de un estado: siendo una ecuación diferencial de segundo orden, necesita que la complementen dos datos para convertirse en descriptiva de situaciones particulares: por ello estos datos definen un estado.

En otras ramas de la ciencia las leyes de la naturaleza no son necesariamente ecuaciones diferenciales, ni hay variables de estado relacionadas con las leyes de forma tan sucinta; siempre existe, sin embargo, una mutua dependencia de estados y leyes. Así, pues, el descubrimiento científico es un acontecimiento dual que implica la selección de variables cruciales y el establecimiento de relaciones entre ellas, como ya hemos apuntado.

Si una partícula se mueve sin restricción alguna en tres dimensiones, hay tres leyes del movimiento análogas a la arriba enunciada; cada ley introduce dos constantes de integración, y la situación completa puede manejarse por medio de seis números. Cuando estos números, es decir, x, y, z y v_x, v_y, v_z, están dados en el instante t_1, ocurrirá que x, y, z, se conocerán en todos los demás instantes como funciones de t; además, por diferenciación podrán obtenerse v_x, v_y y v_z, de modo que nos encontramos en posesión de una descripción completa de la forma en que los estados varían con el tiempo.

La palabra *ley*, tal como se la utiliza en la ciencia, posee una gran variedad de significados; en mecánica, sin embargo, es habitual aplicarla a ecuaciones diferenciales y a otras proposiciones de igual generalidad. No es una buena práctica confundir las leyes con las ecuaciones del movimiento anteriormente expresadas, que son soluciones o aplicaciones específicas de las leyes, provistas de constantes especiales de integración; pero las leyes mismas pueden enunciarse en una gran variedad de formas, de las cuales estudiaremos algunas en la sección siguiente. Queremos primeramente llamar la atención sobre su equivalencia con los principios de conservación.

Por simple integración se ve que la ley

$$m\frac{d^2x}{dt^2}=F(x)$$

conduce a la relación

$$\frac{1}{2}mv^2 - \int_0^x F(x)dx = \text{c.}^{\text{te}}.$$

Desde un punto de vista lógico, las dos ecuaciones tienen el mismo contenido. En la última de ellas, sin embargo, es habitual definir la magnitud $\frac{1}{2}mv^2$ como la energía cinética y $-\int_0^x F(x)dx$ como la energía potencial, de modo que la relación se convierte en un enunciado de la conservación de energía. Se ve, pues, que la conservación de energía, al menos en este sencillo ejemplo, no es un nuevo principio de la naturaleza, sino una interesante forma de enunciar la ley del movimiento.

Otra forma equivalente es ésta: por integración con respecto al tiempo, la ley de NEWTON toma la forma

$$mv - \int_0^t F\,dt = \text{c}^{\text{te}}.$$

La primera magnitud de la izquierda se interpreta como cantidad de movimiento, ímpetu o impulso, y la integral se llama la impulsión de la fuerza. Este resultado expresa, por consiguiente, el conocido hecho de haber una diferencia constante entre el impulso o cantidad de movimiento y la impulsión, que es otro principio de conservación. Las leyes conducen automáticamente a principios de conservación, son equivalentes a ellos. En cuanto a las constantes que aparecen a la derecha de la última y la penúltima ecuaciones, se las suele denominar *constantes del movimiento.*

La situación no siempre es tan elemental como la que hemos encontrado aquí, ya que únicamente hemos prestado atención al movimiento en una dimensión. En dos y tres dimensiones puede llegarse a enunciados de conservación análogos; cabe, sin embargo, que carezcan de interés, debido a la naturaleza analítica de las integrales encontradas[1]: sólo en determinadas condiciones ulteriores tienen propiedades satisfactorias y sólo en estas condiciones se utilizan. Sin embargo, pueden una vez más extraerse de las leyes de NEWTON cuando prevalezcan estas condiciones.

Es conveniente que, a modo de resumen, separemos del método de la mecánica del punto, en cuanto ha sido explicado hasta ahora, sus rasgos filosóficamente destacados. El más notable es la elaboración constructoria de un tipo de sistema llamado partícula que se relaciona con la percepción en virtud de reglas especiales; y la especificidad de estas reglas de correspondencia hace posible inmediatamente utilizar tal construcción interpretativa y limita su relevancia, pues por medio de ellas se restringe el ámbito de aplicación de las leyes. Nos permiten, por ejem-

[1] Excepto para formas especiales de las funciones de fuerza, que para el movimiento en tres dimensiones dependen de x, y, z, las integrales no son funciones unívocas de estas coordenadas.

plo, identificar una piedra pequeña con un punto material, pero no hacer lo mismo con un avión. El sistema está dotado de seis propiedades, cada una de las cuales puede variar en el tiempo, y entre todas forman un estado. Cuando se especifica un estado, la ley del movimiento regula su propagación en el tiempo, si bien, en una versión más ampliada, tal ley permite predecir estados futuros cuando se conozca el estado en el momento actual (o en cualquier otro instante). Desde el estado predicho se puede pasar, mediante reglas parecidas, a la Naturaleza y verificar la predicción; y como el circuito de verificación ha sido recorrido con éxito hasta ahora en un enorme número de casos, podemos afirmar que la teoría de la mecánica de partículas es correcta y las construcciones interpretativas que implica, válidas.

La explicación que hemos dado supone que la función de fuerza forma parte de la ley: las partículas sometidas a fuerzas distintas quedan, por lo tanto, subsumidas bajo leyes diferentes. Ahora bien: ésta no es la interpretación habitual de la ley de NEWTON, que se enseña en la forma: "La fuerza es igual a masa por aceleración"; pero en el sentido que nosotros propugnamos, esta declaración no es más que una definición de fuerza, no una ley, y se convierte en esto último cuando se inserta una función de fuerza adecuada. Estas cuestiones, sin embargo, ocuparán nuestra atención más adelante, cuando consideremos de una forma más general el papel desempeñado por las definiciones.

9.3. LOS PRINCIPIOS INTEGRALES

Las fuerzas no se "toman" de la Naturaleza: son construcciones interpretativas destinadas a hacer que sea exacta la ecuación diferencial que las exige. Como todas las construcciones interpretativas científicas, están enlazadas, en último término, a la Naturaleza por correlaciones epistémicas (lo que explica que sea posible intuirlas como empujones y tirones), pero su origen metodológico radica en informadas suposiciones respecto a qué clase de función hará que las ecuaciones trabajen eficazmente. Esta circunstancia añade un tercer elemento de conjetura a las incertidumbres que ya involucraba la formulación de una ley: al principio el físico no conoce la forma de la ley ni las variables que ha de enlazar, como tampoco puede estar seguro de la función de fuerza que entre en ella. Si se nos permite una tosca figura de dicción, puede decirse que para descubrir una ley tiene que levantarse uno en el aire tirándose de tres mechones de pelo.

En vista de todo esto empieza uno a preguntarse si las leyes de fuerza así entretejidas serán únicas. ¿No hay otras funciones que, al ser introducidas en ecuaciones matemáticas de diferente forma, reproduzcan también la experiencia? Las hay, en efecto; y queremos llamar ahora la atención sobre una clase de ellas.

Por vía de ejemplo, elijamos una ley de movimiento llamada prin-

cipio de HAMILTON, enunciada en 1824 por HAMILTON cuando desarrollaba algunas ideas anteriores de LAGRANGE. Su autor descubrió que es posible determinar una función L de las variables de estado (una vez más, el grupo de seis de que hemos hablado), tal que

$$\int_{t_1}^{t_2} L \, dt \tag{9.2}$$

tenga un valor estacionario; y no se pierde casi generalidad alguna suponiendo que esta integral tenga un valor *mínimo*. Para comprender lo que ello significa, consideremos de nuevo el movimiento de nuestro sistema típico, el punto material. Sabemos cuál es su estado en el tiempo t_1 y queremos saber cuál será en t_2; y lo sabremos merced a la función L, llamada la función lagrangiana, que es lo que esta ciencia debe determinar. Supongámosla conocida por el momento; entonces ignoramos todavía qué camino seguirá la partícula según avance desde su estado en t_1; es decir, desde la situación caracterizada por x_1, y_1, z_1, v_{x1}, v_{y1} v_{z1}; el principio de HAMILTON afirma que seguirá el camino a lo largo del cual sea mínima la integral (9.2); por consiguiente, para encontrarlo tenemos que realizar la integración indicada sobre todos los caminos imaginables y ver cuál da el valor más pequeño. Es difícil aquí permanecer insensible a la evidente implicación, destacada frecuentemente por los filósofos, de que la naturaleza, con su sobrehumana sabiduría, selecciona automáticamente un camino mínimo (en el sentido de este principio) que el ingenio humano sólo puede determinar después de considerables trabajos (véase el capítulo XIX, sección 11).

En la práctica no es necesario realizar un número infinito de integraciones para determinar el camino mínimo: el cálculo de variaciones es una disciplina matemática destinada a manejar problemas de este tipo, y con su ayuda es fácil trazar inmediatamente un grupo de condiciones ("ecuaciones de EULER") que ha de satisfacer el camino mínimo. Y, extrañamente, estas condiciones son idénticas a las leyes de NEWTON [ecuación (9.1)].

Al proseguir el análisis se advierte, además, que la función lagrangiana para el caso aquí considerado no es sino la *diferencia* entre la energía cinética y la potencial, que pueden obtenerse cuando se conoce la función F de la ec. (9.1). Así se ve que el uso del principio de HAMILTON es en gran medida equivalente a una aplicación de la ley de NEWTON, y no conduce a ninguna información nueva: para algunos parece un mero camuflaje de las leyes de NEWTON, para otros una interesante manera de enunciarlas, llena posiblemente de consecuencias filosóficas de gran alcance. Más adelante veremos que las ecuaciones diferenciales, como la ecuación (9.1), representan análisis *causales*, mientras que las ecuaciones integrales implican consideraciones teleológicas; por el momento nos limitamos a dar cuenta de los hechos de la situación.

Las leyes de la mecánica del punto pueden enunciarse, pues, de dos formas enteramente diferentes, como leyes diferenciales y como leyes

integrales[2]; cada forma contiene inicialmente unas funciones desconocidas (F y L) de algunas o todas las variables del estado, funciones que sólo la experiencia puede proporcionar; ambos tipos de ley realizan la misma predicción, que se verifica mediante observaciones; y, finalmente (cosa que resultará más adelante de cierta importancia), es posible demostrar matemáticamente que *las dos formas son equivalentes en el sentido siguiente: La ec. (9.1) es la condición necesaria para la minimización de la integral (9.2).*

A todo lo largo de la sección presente y de las anteriores hemos adoptado una suposición simplificadora: hemos tratado las fuerzas ejercidas sobre la partículo como si fueran conservativas[3]. Pero es posible hacer extensivas y aplicables a casos no conservativos las leyes de NEWTON, así como el principio de HAMILTON; en la solución de problemas concretos, sin embargo, esto es a menudo una generalización útil, pero aquí ofrece poco interés, porque si un sistema no es conservativo siempre cabe hacerlo incluyendo otros sistemas, con tal de que la mecánica pueda enfrentarse con la cuestión. Por ejemplo, el movimiento de un péndulo aislado es conservativo; si se une un péndulo a la lenteja de otro, el movimiento de uno no puede ser descrito por fuerzas conservativas; pero si ambos se incluyen en un sistema de dos puntos materiales (cf. la sección siguiente) tenemos de nuevo un sistema conservativo. Un postulado básico de la mecánica de partículas es que se disponga de sistemas que sean a la vez finitos en extensión y conservativos (a veces se llaman "cerrados" los sistemas con estos dos atributos).

La segunda ley de NEWTON y el principio de HAMILTON son muestras de las dos clases de leyes de movimiento llamadas principios diferenciales e integrales (o minimales). Mas cada una de estas clases contiene muchas otras formulaciones: entre los principios diferenciales podemos mencionar el de D'ALEMBERT y las ecuaciones de LAGRANGE; se puede demostrar que ambos son reducibles a las leyes de NEWTON y derivables de ellas, pero suelen ser más convenientes de usar que estas últimas; gozan de particular favor en situaciones en las que una partícula se mueve bajo la acción de fuerzas dadas, pero está obligada a permanecer sobre una superficie o en una curva: el principio de D'ALEMBERT conduce en tales casos a una solución más directamente que las leyes de NEWTON

Otros conocidos principios integrales son el principio de la *mínima acción* y el de FERMAT. El primero de ellos es parecido al de HAMILTON, pero utiliza una función diferente en lugar de L, y también una integración algo modificada; al parecer fue MAUPERTUIS quien por primera vez lo introdujo en la mecánica (en 1747), aunque en forma un tanto defec-

---

[2] Dejamos aquí de lado la ulterior posibilidad de expresarlas en la forma de ecuaciones de conservación, posibilidad que hemos estudiado en la última sección.

[3] El lector matemático advertirá que esto implica dos condiciones: 1) F ha de ser solamente función de x, y y z, no de t y v_x, v_y, v_z; 2) el rotacional de F tiene que anularse.

tuosa. Lo cierto es que MAUPERTUIS lo anunció con enorme vigor y con un exagerado sentido de su importancia metafísica, pues vio en la circunstancia de que los cuerpos se mueven con el gasto de una "mínima cantidad de acción" una ejemplificación de la perfecta sabiduría de Dios.

El principio de FERMAT de mínimo tiempo, que incluimos aquí entre las leyes de la mecánica, se refiere a la propagación de la luz en medios de índices de refracción distintos. Puede ser expresado en la forma

$$\int_{s_1}^{s_2} \frac{ds}{v} = \text{mínimo},$$

en la que s representa la distancia recorrida por un rayo de luz y v su velocidad; valiéndose de él puede deducirse la ley de refracción de SNELL, pero actualmente se sabe que es un principio inexacto, ya que no tiene en cuenta la naturaleza ondulatoria de la luz.

No hemos intentado distinguir entre una *ley* de movimiento y un principio, tal como el de HAMILTON o el de D'ALEMBERT. Al utilizar el último término estamos siguiendo una nomenclatura sancionada por la historia de la física, y queremos poner bien de relieve la ausencia de toda diferencia lógica o genérica entre estas formulaciones; propiamente hablando, todas deberían ser denominadas leyes de movimiento para que la palabra principio pudiera ser reservada a tesis más generales, como la relatividad y la causalidad, tesis que proyectan sus efectos restrictivos sobre muchas leyes diferentes.

9.4. LOS SISTEMAS DE MUCHAS PARTÍCULAS

Para ilustrar el uso de sistemas, observables y estados son perfectamente suficientes las consideraciones expuestas hasta ahora, y podríamos muy bien pasar por alto la mecánica de los agregados de partículas como mero refinamiento de los principios ya examinados. Preferimos, no obstante, incluir dicha cuestión, porque sucede que aquí, en el tránsito desde un solo punto material a los agregados de ellos, se esconde el punto central de un aserto frecuente pero mal analizado, a saber, el de que en mecánica *el todo no es más que la suma de sus partes.* Quizá se aclare lo que entendemos con esto si examinamos brevemente cómo se forman los sistemas mecánicos compuestos y cómo se describe su comportamiento.

El sol y los planetas forman un agregado de este tipo, y las moléculas de un gas forman otro. Este último es quizá el más interesante desde nuestro actual punto de vista. Al considerarlo, observamos primero, aunque parezca trivial, que el *sistema* total es una yuxtaposición espacial de sistemas más simples, y en ello radica una de las características de la mecánica, que no comparten otras disciplinas: en electrodinámica, por ejemplo, donde un *campo* representa el sistema simple, no se produce un sistema más comprensivo de forma tan sencilla. Debido a esta diferencia,

es posible que dos campos se anulen uno a otro, pero dos partículas, aunque puedan enlazarse en una unión estrechísima, siempre siguen siendo dos; en un simple sentido aritmético, por lo tanto, un sistema mecánico es, en efecto, la suma de sus partes, lo cual tampoco es enteramente trivial: no podría decirse lo mismo de un agregado de fotones mezclados con átomos materiales, pues los fotones se absorben y vuelven a emitir constantemente, y su número es, por consiguiente, indefinido.

Para poner de manifiesto cómo se describe el comportamiento de los agregados mecánicos, volvamos a las moléculas de un gas y utilicemos el método de NEWTON (admitiendo, naturalmente, que podría también emplearse cualquiera de los otros "principios" si se lo ampliara convenientemente). Tratemos de encontrar otra vez una función que represente la fuerza de una partícula dada, pero que ahora dependa también de las coordenadas de todas las demás partículas: llamemos n al número de moléculas existentes en un gas y consideremos una, rotulada con un índice i, cuya masa sea m_i; su ley de movimiento será

$$m_i \frac{d^2x_i}{dt^2} = F_{ix}(x_1 y_1 z_1 \ldots x_n y_n z_n), \tag{9.3}$$

juntamente con otras dos para las componentes sobre y y z del movimiento. En total debemos resolver simultáneamente $3n$ ecuaciones diferenciales de segundo orden análogas a (9.3). Obsérvese que todas las variables dependientes, $x_1 \ldots z_n$, aparecen en todas y cada una de las ecuaciones, característica que hace que éstas sean, en general, de solución extremadamente difícil, si no imposible: solamente se pueden encontrar soluciones exactas para dos partículas.

El físico evita este punto muerto matemático utilizando lo que él llama *fuerzas entre dos cuerpos,* con lo que logra una gran simplificación de la ecuación (9.3). Apoyándose en una experiencia bastante general [4], supone una F_{ix} que no tenga la complicada forma indicada más arriba, sino que sea la suma de las interacciones *dos a dos;* y matemáticamente esto equivale a hacer de F_{ix} una suma de funciones cada una de las cuales contenga las coordenadas de dos partículas solamente, siendo una de ellas la i. Aun con esta radical simplificación, la ecuación (9.3) no puede resolverse exactamente para n partículas ($n>2$), excepto cuando se adopta una clase especial de fuerza (la fuerza de la ley de HOOKE); sin embargo, aun cuando tal vez no sea posible resolver las ecuaciones de movimiento, cabe obtener ciertas aproximaciones y demostrar ciertas proposiciones generales referentes a la energía total del sistema y a la

[4] Supongamos que la molécula 1 se halle en las proximidades de las moléculas 2 y 3. De ordinario se admite que la fuerza total que actúe sobre la molécula 1 será la suma vectorial de las fuerzas debidas a 2 y a 3, siendo cada una de ellas función de la distancia que separe la pareja de moléculas en interacción: esto corresponde a la acción de fuerzas entre dos cuerpos. Si la presencia de la molécula 3 introduce una diferencia en la fuerza de 2 sobre 1, permaneciendo inalterada la posición relativa de las moléculas 2 y 1, nos enfrentaríamos con una fuerza entre tres cuerpos.

distribución media de sus moléculas. Muchos de estos resultados son de interés en la mecánica estadística, disciplina de la que, no obstante, no nos ocuparemos por el momento.

¿Queda explicado el *comportamiento* del agregado del gas por los comportamientos individuales de sus moléculas constitutivas? Esta es una segunda forma (y quizá más significativa) en la que se puede formular la cuestión relativa al todo y sus partes; pero ahora, sorprendentemente, obtenemos una solución si miramos las leyes del movimiento, y otra si miramos sus soluciones. Porque, supuesto que empleemos fuerzas ordinarias entre dos cuerpos, las leyes de movimiento no son más que una tediosa repetición de ecuaciones diferenciales análogas, cada una de las cuales reafirma de la molécula $i+1$ lo que la anterior dijera de la molécula i; ciertamente, el enunciado de las *leyes* básicas para n partículas no implica nada que trascienda las leyes para dos partículas; pero su solución lleva consigo características totalmente inesperadas.

Tomemos, por ejemplo, el concepto del químico de una fase o de un estado de agregación. No hace referencia alguna a una sola molécula: las moléculas del argón y de la mayoría de las demás sustancias no polares son exactamente las mismas, ya se hallen en estado gaseoso, líquido o sólido; y tampoco las fuerzas existentes entre ellas predeterminan la fase, pues éstas también son las mismas en los tres estados. Evidentemente, fase es un concepto referible a agregados, y no a puntos materiales aislados: expresa el comportamiento del grupo, no contenido en el carácter de los estados individuales ni en sus leyes, pues el mismo conjunto de ecuaciones (9.3) describe el gas, el líquido y el sólido. Lo que determina la fase, en efecto, es un conjunto de parámetros, como la temperatura y la presión, que también son ciegos para el comportamiento de las moléculas individuales y solamente poseen significado para muchas. Repetimos, pues, algo que es evidentemente cierto: cuando se presta atención a las propiedades descriptivas de los agregados mecánicos, la suma es, en verdad, diferente de sus partes; y, puesto que incluye características *(v. gr.,* la fase) que carecen de significado con respecto a las partes, puede muy bien decirse que la suma es más que sus partes.

Contemplado desde un punto de vista lógico, todo esto es muy extraño. Porque, ¿cómo se pueden obtener nuevas características mediante el proceso analítico de resolver ecuaciones diferenciales? Para esclarecer las cosas, debemos reconocer que las cualidades llamadas nuevas y emergentes (como fase, temperatura y presión de un conjunto de moléculas) están implicadas *lógicamente* por las leyes que regulan a los individuos, pero esto no les impide poseer el carácter *psicológico* de novedad que expresa el término *emergente:* el conocimiento no necesita ser sintético, en sentido lógico, para ser interesante, sorprendente o, incluso, revolucionario. Toda persona que labora en la ciencia teorética experimenta a ve-

ces una sensación de auténtico asombro por las consecuencias creadoras de actividades puramente reflexivas, independientemente de su naturaleza analítica.

Hemos apuntado lo que puede dimanar de la simple suposición de fuerzas entre dos cuerpos. La mecánica de las fuerzas entre muchos cuerpos constituye un campo en gran parte inexplorado hasta el presente: PRIMAKOFF y HOLSTEIN [5] han considerado algunos de sus aspectos en relación con ciertos problemas nucleares. Es cierto que la complejidad de los fenómenos de agregados engendrados merced a tales fuerzas es extrema y que pueden hacerse emerger muchas propiedades nuevas; todo lo cual parece posible sin desviarse de la actitud fundamental de la mecánica de partículas, con sus característicos sistemas y estados y su postulado de yuxtaposición espacial. Quizá el biólogo que mire con malos ojos la explicación mecánica, por parecerle que su carácter simple e ingenuo la descalifica (según hacen algunos), debiera cambiar de actitud: suele abandonarse la mecánica como medio para comprender los sistemas orgánicos, no porque sea demasiado simple, sino porque es demasiado compleja y difícil.

Existe, finalmente, un tercer significado que debe darse al todo y sus partes. Hemos visto que el comportamiento de un agregado mecánico puede mostrar características integrativas que no hagan ninguna referencia específica a las partículas (esas características integrativas son la fase, la temperatura y la presión); ahora bien, puede suceder que el agregado manifieste también una especie de superdiferenciación, una especificidad que presuponga el todo en el sentido en que las propiedades integrativas presuponen las partes, sin que éstas, no obstante, estén determinadas por el todo. Me refiero a cosas tales como función y reproducción orgánicas: las fuerzas entre dos cuerpos no parecen dar razón de ellas; mas actualmente se desconoce si las fuerzas entre muchos cuerpos la podrán dar, y es ocioso especular sobre este punto, debido a la penuria de conocimientos analíticos respecto a la solución general de las ecuaciones del tipo (9.3).

Nuestras conclusiones referentes a los sistemas mecánicos de muchas partículas pueden resumirse en estas tres proposiciones: 1) como *sistema* espacial, un agregado mecánico es exactamente la suma de sus partes; 2) en su *comportamiento* colectivo patentiza rasgos que no son pertinentes para los individuos, por lo que, en cuanto al comportamiento, el todo es más que la suma de sus partes, y 3) la aparición de una superdiferenciación, evidente en los sistemas orgánicos, no se ha podido retrotraer, hasta ahora, a leyes individuales de movimiento. (Las dificultades matemáticas inherentes a esta empresa parecen en la actualidad impedirlo por razones prácticas.)

En el capítulo XX volveremos una vez más sobre el problema de la organización y mostraremos cómo ciertos principios físicos, al superpo-

[5] H. PRIMAKOFF y T. HOLSTEIN: *Phys. Rev.* 55:1218 (1939).

nerse a las leyes mecánicas cuánticas, producen los rudimentos de la superdiferenciación.

9.5. La mecánica de los cuerpos rígidos

En esta rama de la mecánica, en la que hay relativamente pocas cosas de interés metodológico, y en la que, por consiguiente, no necesitamos detenernos mucho tiempo, el sistema es un cuerpo rígido (que definiremos más adelante), y las propiedades significativas son la masa, los tres momentos principales de inercia, seis coordenadas y seis velocidades. La masa y los momentos de inercia son propiedades intrínsecas que no cambian en el tiempo, mientras que las otras doce dependen del tiempo y pueden agruparse para formar un estado.

Las leyes de movimiento son ecuaciones diferenciales cuya solución completa admite doce constantes de integración, y la relación de estas constantes con las variables de estado es similar a su contrapartida en el caso de una *partícula,* ya tratado: puede hacerse que las constantes de integración sean los valores de las variables de estado en un momento dado. No nos interesan aquí la complejidad de las ecuaciones diferenciales ni las dificultades que acompañan a su solución: baste decir que suelen tratarse bajo numerosas suposiciones simplificadoras, tales como ausencia completa de fuerzas externas y momentos iguales de inercia en torno a los distintos ejes. El caso de la peonza que gira, oscila y se desplaza es uno de los elementos más sencillos de la mecánica de los cuerpos rígidos.

El sistema de la presente disciplina, el cuerpo rígido, no carece de relación con el sistema de la mecánica de partículas: cabe concebirlo, en efecto, como una reunión de partículas en la que permanezcan fijas todas las distancias entre ellas. Las leyes de movimiento de un cuerpo rígido pueden deducirse imponiendo como condición de las ecuaciones (9.3) la constancia de las distancias entre partículas. Es, por ello, adecuado considerar esta rama de la mecánica como un apartado de la mecánica de partículas, aunque la comodidad sugiere se la sitúe en lugar separado: esto se debe a que algunos de los resultados de la teoría de un cuerpo rígido, particularmente cuando éste es simétrico y está constreñido a girar en torno a un eje fijo, son tan simples y recuerdan de tal modo a la mecánica del punto material único que es conveniente alejar toda idea de composición y tratar el cuerpo rígido como un sistema por derecho propio.

Debemos añadir que existen también excelentes testimonios intuitivos en favor de que sea doce el número de variables que definen un estado. Un cuerpo rígido tiene seis grados de libertad. Para ver esto advertimos primero que bastan tres números para especificar la posición en el cuerpo de un punto fijo dado en relación a un sistema de coordenadas; se necesitan, además, dos parámetros para definir la posición de una

línea fija en el cuerpo y que pase a través de un punto fijo, mientras que la sexta cantidad mide la rotación del cuerpo en torno a esa línea. Las tres últimas variables mencionadas son los llamados "ángulos eulerianos" o algún otro conjunto equivalente *(v. gr.,* los parámetros de CAYLEY-KLEIN). Estas seis variables, juntamente con sus tasas de cambio con el tiempo, son las cantidades que componen un estado.

En la tabla 19.1 (pág. 372) puede verse un resumen de los puntos más salientes que hemos desarrollado; en ella se expone la relación existente entre el esquema de los sistemas, los observables y los estados y el requisito de causalidad.

RESUMEN

Este capítulo ilustra el empleo en mecánica de los conceptos de sistema, observable y estado. Hacemos una distinción entre leyes y ecuaciones de movimiento, pasamos revista a varias formas equivalentes de enunciar las leyes (ecuaciones diferenciales, ecuaciones integrales y principios de conservación) y efectuamos una breve investigación de los sentidos en que un mecanismo es o no la suma de sus partes.

BIBLIOGRAFIA

INGLIS, D. R.: *Dynamic Principles of Mechanics,* Filadelfia, The Blakiston Company, 1949.

LINDSAY, R. B.: *Physical Mechanics,* Nueva York, John Wiley & Sons, Inc., 1933.

MACH, E.: *Science of Mechanics,* The Open Court Publishing Company, La Salle de Ill., 1907 [ed. orig.: *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt,* 1883; vers. cast. (de la ed. alemana de 1912): *Desarrollo histórico-crítico de la mecánica,* Buenos Aires, Espasa Calpe, 1949].

MARGENAU, H., y G. M. MURPHY: *Mathematics of Physics and Chemistry,* Nueva York, D. Van Nostrand Company,, Inc., 1943 [vers. cast.: *Las matemáticas de la Física y de la Química,* Madrid, EPESA, 1952].

PAGE, L.: *Introduction to Theoretical Physics,* Nueva York, D. Van Nostrand Company, Inc., 1928.

SLATER, J. C., y N. H. FRANK: *Introduction to Theoretical Physics,* Nueva York, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1933 [vers. cast.: *Introducción a la Física teórica* (2 t.), Buenos Aires, Espasa Calpe, 1951].

WEBSTER, A. G.: *Dynamics,* 2.ª ed., Nueva York, G. E. Stecher & Company, 1922.

CAPITULO X

LA FISICA DE LOS MEDIOS CONTINUOS

10.1. La mecánica de los medios continuos

La alternativa planteada entre continuidad y discontinuidad, por lo lo que se refiere a la estructura de la materia, fue advertida ya desde los primeros estadios de la ciencia y ha dado origen en todos los tiempos a grandes controversias. Suscita un espinoso problema, pues aunque la materia parece ser continua, manifiesta una estructura atómica si se la examina con más detenimiento, y, aunque su estructura sea atómica, como actualmente se concibe, ¿quién puede decir que lo que componga las partículas elementales que forman el átomo no será, en último término, continuo? No es probable que este viejo problema reciba jamás una solución empírica: la "verdadera" contestación, si es que existe, puede mantenerse oculta para siempre en las incertidumbres de la experiencia inmediata (caps. IV y VI). La cuestión, por tanto, no estriba en si la materia es continua, sino en cómo logran tener éxito las teorías que miran como si fuese un continuo la construcción interpretativa que adoptan como *sistema.*

La física moderna ha experimentado una gran pérdida de interés, y también de sensibilidad, en lo que hace referencia a las exquisitices conceptuales del problema del continuo, mientras que las matemáticas, perpetuando la curiosidad de la Grecia antigua, se mantienen, por el contrario, conscientes de ellas y están encontrando medios para tratar con viejas paradojas. Tal vez más importante aún es el hecho de que el matemático está intentando hacer compatible lo discreto con lo continuo mediante el estudio y la adquisición de conocimientos que le permitan manejar las funciones continuas con discontinuidades o singularidades. La teoría de la medida de conjuntos de puntos ha logrado ya mucho en esta dirección, pero, como hemos dicho, el físico manifiesta en la actualidad poco interés por estos progresos: parece probable que la teoría de conjuntos se aplique a la estructura de la materia en un próximo futuro, pero la comodidad y el éxito de los métodos tradicionales de describir variaciones "suaves" de entidades en el espacio y el tiempo reducen la urgencia de estos intentos. Como resultado de ello, la física acoge un híbrido conceptual bajo la forma de una disciplina llamada mecánica de

medios continuos, que trata la materia como un continuo, si bien admitiendo al mismo tiempo su estructura atómica [1].

El medio continuo [2] ocupa parte del espacio euclidiano de tres dimensiones o la totalidad de él, y constituye el *sistema* de esta rama de la ciencia. Sus propiedades son completamente distintas de las que hemos encontrado hasta ahora, pues un medio continuo es una entidad no localizada que tiene sus propiedades distribuidas a través del espacio. De ahí se sigue la necesidad de utilizar *cuatro* variables independientes, x, y, z, t, en vez de la primitiva t solamente, y de ellas debe hacerse que dependan las propiedades: cualesquiera que sean éstas serán funciones de aquellas cuatro variables independientes.

Una vez especificado así el sistema, volvemos a sus observables significativos. Estos son, ante todo, la densidad de masa, que es una propiedad intrínseca correspondiente a la masa que antes empleábamos y que no depende de t (si bien lo hace, naturalmente, de x, y, z), y un conjunto de cantidades llamadas tensiones, que son análogas a las coordenadas de un punto material o de un cuerpo rígido, de suerte que se conoce el estado completo del sistema cuando todas las tensiones están dadas como funciones de x, y y z a un instante determinado (puede considerarse cada tensión como el desplazamiento momentáneo de un punto normalmente situado en x, y, z, dentro del medio).

En el medio continuo general hay en total seis componentes de la tensión, que es ventajoso sintetizar en un tensor simétrico. Las ecuaciones son, por lo tanto, ecuaciones tensoriales, pero esto no ofrece aquí mayor interés; más importante es la circunstancia de que, en atención al uso de cuatro variables independientes, las leyes de movimiento se han convertido en ecuaciones diferenciales parciales y abren así nuevas y más amplias perspectivas de elaboración.

No estaría de más que, al llegar a este punto, reflexionara el lector sobre la diferencia de estructura, así como de implicaciones básicas, entre las ecuaciones diferenciales *ordinarias* y las *parciales*. Si posee experiencia matemática obtendrá gran provecho pasando revista a dos sencillos ejemplos: 1) la solución de la ecuación ordinaria de segundo orden que representa a una partícula en movimiento armónico simple; 2) la

[1] Cuando se le interroga seriamente, el físico admite el carácter aproximado de esta disciplina que, según supone, describe los fenómenos producidos en regiones del espacio bastante pequeñas comparadas con las dimensiones macroscópicas, pero lo suficientemente grandes como para contener gran número de átomos o moléculas. Enuncia así *reglas de correspondencia* muy plausibles que le impiden aplicar la teoría del continuo allí donde fracasaría.

[2] La vaguedad de esta expresión es deliberada. Estamos tratando aquí con un continuo material, desde luego, que es la cosa más próxima a nuestra vieja conocida la "sustancia"; pero los medios continuos no necesitan ser materiales, como se verá en la sección siguiente. Lo que distingue un continuo material de otros es que la *densidad de masa* es una de sus propiedades; y, evidentemente, ninguna otra propiedad que pueda relacionarse con la observación mediante reglas de correspondencia puede reemplazar a la densidad de masa sin acabar con la importancia de la construcción interpretativa que llamamos medio continuo.

solución de la ecuación de onda tridimensional en algún sistema de coordenadas conveniente. La filosofía de la física permanece eternamente misteriosa para el observador fortuito que excluye por completo de sus inquietudes el método matemático; por otra parte, no es preciso ser un experto en análisis matemático para formar una apreciación correcta de la función general de una descripción física: parece que la circunspección adquirida como consecuencia de la atención dispensada a otros problemas abstratos de la filosofía es un buen sustituto de la técnica matemática. Procederemos apoyándonos en esta convicción, por lo cual trataremos de poner aquí de relieve las principales diferencias entre las ecuaciones diferenciales ordinarias y las parciales, en beneficio del lector que se halle sólo ligeramente versado en matemáticas.

La solución de una ecuación diferencial ordinaria se vuelve definida fijando las constantes de integración, y ya hemos visto que el número de constantes necesarias determina la elección de las variables de estado. En la mecánica de los medios continuos esta relación entre el tipo de ecuación y las variables de estado es, asimismo, interesante, si bien menos sencilla. La solución de una ecuación diferencial parcial que aquí necesitamos no se realiza mediante una asignación de constantes, sino, por lo general, nada menos que mediante una descripción completa de las variables independientes a lo largo de todo el medio continuo en un instante dado. Sea S una componente de la tensión, esto es, un representante del estado de nuestro continuo. Queremos conocer S como función de x, y, z y t; pero la ley no permitirá averiguarla a menos que insertemos en ella como condición inicial una $S\ (x, y, z, t_1)$ conocida, esto es, la distribución de S por todo el medio continuo en un instante fijo t_1; vemos así por qué se necesita una función de x, y, z para especificar el estado de un medio continuo en vez de los *números* ordinarios [3] que encontrábamos en la mecánica de partículas.

Después de todo, éste es un resultado bastante obvio, que ya hemos obtenido por medios más sencillos y que sirve para resaltar una vez más el parentesco estructural entre estados y leyes. Pero la misma consideración conduce también a un resultado que es menos trivial y que cabía no haber previsto: en la mecánica de los puntos materiales la descripción de un estado a base exclusivamente de coordenadas hubiera sido incompleta, ya que se necesitan también velocidades, esto es, tasas de variación de las coordenadas; en la mecánica de los medios continuos un estado se define completamente solo por las componentes de la tensión: *no* se necesitan sus tasas de cambio. La razón de que así suceda radica en el peculiar carácter de las leyes de movimiento: una ecuación diferencial parcial del tipo utilizado en la teoría de los medios continuos puede resolverse con sólo que se conozca la variable dependiente (S en nuestro caso), sin que sea preciso conocer su derivada con respecto al tiempo.

[3] Las variables de estado de la mecánica de partículas, esto es, x, y, z, v_x, v_y y v_z, forman un conjunto de números en cualquier instante fijo t_1.

El uso de ecuaciones diferenciales parciales hace, pues, la descripción más compleja en un sentido y más sencilla en otro.

Debemos llamar la atención sobre el carácter esquemático y excesivamente simplificado de la precedente explicación. Las ecuaciones diferenciales parciales plantean a menudo incómodos problemas, algunos, quizá, de profunda importancia filosófica. Un rasgo curioso es la forma en que emparejan al tiempo con el espacio: si S es alguna función especial de x, y y z en el instante actual, las ecuaciones pueden implicar que el estado ha tenido esta forma a través de toda la eternidad y seguirá teniéndola siempre[4]; en cambio, una $S(x, y, z)$ arbitrariamente elegida, si bien posible en un momento, no puede persistir durante ningún tiempo finito.

Vamos a plantear ahora otra cuestión de interés. Hemos visto que las leyes de movimiento predicen $S(x, y, z, t)$ cuando se da $S(x, y, z, t_1)$. Mas, ¿por qué separan la variable temporal para un papel especial al aplicar este esquema?: ¿no predecirán $S(x, y, z, t)$ tales leyes cuando esté dada $S(x, y, z_1, t)$, por ejemplo? Esto es preguntar si puede conocerse el comportamiento de un medio continuo en todas partes y en todos los instantes temporales cuando estén dados para todo tiempo sus estados sobre una *superficie;* y la contestación es afirmativa en la mayoría de los casos.

Puede afinarse más nuestra investigación: ¿predecirán las leyes $S(x, y, z, t)$ cuando esté dada $S(x, y, z_1, t_1)$? Es decir, ¿basta el conocimiento de S sobre una *superficie* en un *instante* para predecir lo que suceda en todas partes y en todos los momentos temporales? La contestación es, en general, negativa; pero si están dadas tanto $S(x, y, z_1, t_1)$ como $\frac{d}{dt} S(x, y, z_1, t_1)$, la contestación puede muy bien ser afirmativa. Se dice que los medios para los cuales la contestación es afirmativa satisfacen el principio de HUYGENS.

En esta explicación hemos dejado en total imprecisión el significado de S: hemos dicho que representaba una tensión, esto es, un desplazamiento de puntos de sus posiciones normales, y que su forma era la de un tensor, de modo que, en general, es un conjunto de seis funciones diferentes. Esto sería cierto para un continuo sólido con propiedades diferentes en las distintas direcciones; sin embargo, como en el caso del punto material, el número de variables puede reducirse bajo condiciones simplificadoras. Para la partícula esto exigía limitaciones referentes al movimiento; aquí exige condiciones acerca de la naturaleza del medio continuo. El ejemplo más sencillo posible es un fluido (que no sea sede de deslizamiento alguno y sea isótropo), en el que S se reduce a una única función; es esta S la que aparece como variable independiente de la ecuación de las ondas sonoras que atraviesen un gas.

Si hubiéramos incluido el movimiento convectivo de nuestro medio,

[4] Por ejemplo, si una onda es sinusoidal ahora, lo será siempre.

toda la descripción del sistema habría sido mucho más compleja, pero el método subsistiría idéntico, pese a la adición de nuevos principios físicos; por ello omitimos su examen.

10.2. La teoría del campo electromagnético

El método de la ciencia alcanza su más completo desarrollo en la teoría del campo electromagnético: en ella se revela como algo de abstracta belleza e impresionante poder que permite una intelección tanto de unas actividades de espectacular construcción racional como de otras de refinada observación. El componente lógico del método científico se pone de manifiesto en las ecuaciones de campo con toda su elegancia matemática, y el componente empírico sale a primer plano en las sorprendentes técnicas experimentales que este tema ha creado; por ello podría decirse que, para que la realidad física tenga sentido, tal método debe extraer su esencia, en una medida apropiada, de la ciencia del electromagnetismo, y no limitarse exclusivamente a las duras y rígidas partículas de la mecánica, como tan a menudo se ha hecho en el pasado. En esta sección analizamos la teoría del campo siguiendo la pauta trazada por nuestro modelo: sistema, observables y estado.

Pero debemos hacer historia del tema, ya que presenta uno de los raros ejemplos en que la historia, que generalmente camina a tientas y a trompicones hacia el conocimiento organizado, avanza resuelta y decididamente, alcanzando por fin su objetivo en un ingenioso vuelo. En la persona de Faraday muestra un ejemplo de inspirada experimentación, un genio provisto de una varita mágica descubridora de tesoros científicos y que, sin embargo, es persona reacia a especular más allá de los confines de su intuición visual: para él, como para todos sus precursores y muchos de sus sucesores, el *sistema* de la electrodinámica era un medio material llamado más tarde el éter, que podía estar sometido a tensiones a la manera del continuo *material* del último párrafo; para él la electrodinámica era una extensión de la mecánica de los medios continuos. Incluso Maxwell, el gran sintetizador, cuya confianza en la verdad formal de sus ecuaciones era tan grande que le inducía a extraer de ellas lo que debieron de parecer grotescas predicciones [5], se mostraba reacio a abandonar la sustancia material: también él consideraba el objeto de sus investigaciones como una rama de la mecánica. Hoy en día se maravilla uno de su contención: su sistema de ecuaciones era tan completo, tan maravillosamente coherente y total como entidad lógica que podía muy bien concebírselo como definidor de algo autónomo, algo no mecánico; pero Maxwell vio en él sólo las huellas de otra clase de materia. Es grande el contraste entre la actitud de Maxwell

[5] Por ejemplo, la existencia de las ondas de radio.

y la nuestra actual, ya que nuestra moderna juventud[6] comenzará afanosamente con cualquier grupo de ecuaciones poseedoras de credenciales formales la mitad de buenas que las de MAXWELL y supondrá, con esperanza suficiente de éxito para justificar grandes trabajos, que definen una clase de realidad de la naturaleza.

Esta inversión de actitudes se ha producido, naturalmente, a través de los fracasos de todos los intentos por detectar el éter material. Carecemos de espacio para examinar esos interesantes episodios, por lo que remitimos al lector a otras obras[7]; baste decir aquí que el éter no murió de muerte accidental, que durante el curso de su enfermedad recibió los cuidados de los más eminentes cirujanos, que se esforzaban por mantenerlo vivo y que, cuando murió, su marcha fue presenciada por las autoridades más descollantes y dignas de crédito. Podemos, pues, estar seguros de que está realmente muerto como entidad material; algunos dicen todavía que puede revivir, pero actualmente no ofrece grandes perspectivas la posibilidad de que tal cosa suceda.

¿Qué es, entonces, el sistema que contiene fenómenos electromagnéticos? No podemos describirlo a base de simples términos ostensivos, porque no se corresponde directamente con ninguna experiencia inmediata; es como el continuo material en algunos aspectos formales, pero sin sus cualidades inerciales y gravitatorias. Posee, de hecho, muchos de los paradójicos rasgos con que la mente popular reviste a los fantasmas, salvo que está exento de toda vaguedad, aunque no material en sí mismo y capaz de subsistir de acuerdo con sus propias leyes en ese estado desencarnado, puede, sin embargo, interactuar con la materia. Su nombre es el de *campo* electromagnético.

La única forma concisa de definirlo es decir que es portador de ciertas propiedades muy determinadas, a través de las cuales alcanza estado científico y, si se quiere, existencia. Esta infecundidad con respecto a sugerencias visuales no es un defecto del campo: es un síntoma de pureza lógica y certifica la ausencia de adulteración. Cuando pensamos en un punto material, es frecuente que una hueste de extrañas asociaciones con pesos, experiencias táctiles, etc., se deslicen en nosotros, a menudo obscureciendo su significado; en realidad, un punto material, cuando se lo comprende correctamente, es lo que posee la propiedad "masa" tal como aparece en las leyes de NEWTON (o en alguna otra) y puede ser localizada por medio de tres coordenadas: todo lo demás es innecesario, aunque constituya en ocasiones un bagaje psicológicamente útil. Del mismo modo, pues, el campo queda *definido* por sus propiedades.

---

[6] Cf. casi cualquier número reciente de la *Physical Review* y léanse los estudios sobre electrodinámica cuántica.

[7] Véanse, por ejemplo, J. LARMOR: *Aether and Matter,* Cambridge, 1900; E. T. WHITTAKER: *A History of the Theories of Aether and Electricity,* Longmans, Green & Co., Inc., Nueva York, 1910; BLACKWOOD, HUTCHINSSON, OSGOOD, RUARK, St. PETER, SCOTT and WORTHING: *Atomic Physics,* John Wiley and Sons, Inc., Nueva York, 1933.

Estas propiedades son dos magnitudes vectoriales llamadas intensidades de los campos eléctrico y magnético, cuyos símbolos habituales son E y H. Por ser vectores, son cada uno equivalentes a tres escalares: de ahí que estemos manejando seis propiedades independientes (desde luego, no carecen por completo de restricciones, ya que han de satisfacer las reglas de transformación de vectores, lo cual les impone ciertas limitaciones que no vamos a examinar ahora). Estas seis cualidades juntas forman un estado del campo.

Las hemos llamado "propiedades" y "magnitudes" sin mucha discriminación. En un sentido general son observables. Anteriormente (capítulo VIII), hemos presentado una distinción entre observables poseídos y latentes, y atribuimos los primeros cuando el contenido específico de observaciones similares no cambiaba—por ejemplo la rosa no es roja, azul, blanca, etc., en diferentes observaciones sobre el mismo estado físico—; encontrábamos esta coherencia en las propiedades de todos los sistemas estudiados hasta ahora (puntos materiales, cuerpos rígidos, medios continuos mecánicos) y se supone que también se da con respecto a los observables **E** y **H**. Por esa razón séanos permitido llamarlas magnitudes poseídas por el campo.

En la moderna electrodinámica cuántica se las ha tratado más comúnmente como observables latentes cuyos valores medios se "dispersan" tras la observación. Si bien esto ha dado algún buen resultado [8] la teoría no está todavía madura para el análisis filosófico; y si la conjetura de HEISENBERG es correcta, es un enfoque que tal vez sea preciso abandonar. Volvemos, por tanto, a la electrodinámica "clásica", donde **E** y **H** eran magnitudes del tipo usual.

Como es de esperar, **E** y **H** son funciones del tiempo. Pero, comoquiera que se suponga que el campo penetra el espacio, comparten con las tensiones del continuo mecánico el carácter de ser también funciones de x, y y z. A partir de aquí todo viene a ser bastante similar a lo dicho en el párrafo precedente: las "leyes de movimiento"—naturalmente, no existe movimiento en el sentido material—son ahora ecuaciones de MAXWELL, cuatro ecuaciones diferenciales parciales constituidas de modo que propaguen un estado; es decir si $\mathbf{E}(x, y, z, t_1)$ y $\mathbf{H}(x, y, z, t_1)$ están dadas para un instante fijo t_1, las ecuaciones permiten el cálculo de $\mathbf{E}(x, y, z, t)$ y $\mathbf{H}(x, y, z, t)$ para todos los instantes t.

Tales ecuaciones, sin embargo, no forman una teoría científica completa: por lo que a ellas afecta, el campo sería un mundo de aislados fantasmas que no podrían dar a conocer su presencia. Es necesario, en efecto, complementar las ecuaciones de MAXWELL con una proposición matemática que exprese lo que las fuerzas de campo hacen a la materia, proposición que ha sido formulada por LORENTZ, el cual logró un éxito parcial al introducir la materia en el campo bajo la forma de electrones.

---

[8] Cf. W. HEITLER: *The Quantum Theorie of Radiation*, Oxford University Press, Nueva York, 1944.

La ciencia de la electromagnética se ha convertido así en un híbrido que comprende medios continuos además de partículas, y para muchos pensadores esta necesidad ha echado a perder su belleza; pero se mantiene viva la esperanza de que algún día, cuando se hayan resuelto más problemas, la partícula se presente como una singularidad de los vectores de campo y se funda así con el concepto de campo. Si esto llega a suceder, la mecánica de partículas quedará amalgamada con la electrodinámica. Como sabemos por lo expuesto en el capítulo V, los principios metafísicos impulsan la ciencia en esa dirección; pero cualesquiera nuevos comentarios sobre esta esperada unión deben esperar hasta que se la haya logrado. No está de más, por tanto, que volvamos a las ecuaciones de campo en su forma pura y simple.

Las ecuaciones de MAXWELL poseen varias propiedades formales dignas de mención. En primer lugar, cabe combinarlas de forma que produzcan lo que se conoce con el nombre de ecuación de onda, cosa que puede interpretarse diciendo que las fuerzas de campo se difunden a través del espacio con una velocidad finita, a saber: la velocidad de la luz, c. Dicho de otro modo, ningún cambio de $\mathbf{E}$ o de $\mathbf{H}$ que tenga lugar en el punto A podrá detectarse en el punto B, a menos que el tiempo transcurrido sea mayor que la distancia entre A y B dividida por c. Esto ha causado gran alivio a los filósofos a quienes turbaba la idea de la acción a distancia, dado que pueden ya decir de un modo sancionado por las matemáticas que hay cierta influencia que pasa de A a B: el campo ha llegado así a considerarse como un mediador entre causa y efecto, y se ha reavivado formalmente la vieja noción de "acción por contacto" (lo contrario de la acción a distancia). La utilidad de todo esto no es completamente clara teniendo en cuenta la índole no material del campo, mas parece ser razonablemente satisfactoria para los inclinados a la mecánica. No hay nada erróneo, lógica ni científicamente, en el concepto de acción a distancia; y el único placer respetable que puede derivarse del papel del campo como mensajero temporal procede del mayor grado de uniformidad que confiere a las diferentes teorías científicas.

Otra consecuencia de las leyes de MAXWELL es la existencia de "constantes del movimiento", por utilizar una expresión ya introducida en la sección 9.2: es posible integrar las ecuaciones, cosa que lleva a postular la energía y el momento del modo a que estamos acostumbrados, poco más o menos. Observamos de nuevo que estos principios de conservación son una consecuencia analítica de las leyes del movimiento, no algo inducido a partir de la observación directa; cualquier campo electromagnético posee energía y momento en virtud de las ecuaciones de MAXWELL, no independientemente de ellas, y observar la constancia de la energía electromagnética y del momento es una forma de comprobar las ecuaciones.

Una rama del electromagnetismo de una belleza especial está constituida por la electrostática, en la que la variable temporal se elimina arbitrariamente de todas las ecuaciones. Físicamente, esto equivale a

preguntar qué formas de **E** y **H** son compatibles con las ecuaciones de MAXWELL cuando las fuerzas de campo son constantes en el tiempo. Entonces, en vez de predecir estados en instantes futuros, las leyes especifican ciertas posibles distribuciones espaciales de **E** y **H**, rechazando todas las demás como imposibles; esta circunstancia se sigue del carácter "parcial" de las ecuaciones diferenciales y es, por consiguiente, desconocida en la mecánica de partículas, en la que *cualquier* configuración estática de partículas es posible suponiendo unas fuerzas adecuadas.

Hasta el momento, nuestra exposición ha favorecido los elementos constructorios del electromagnetismo, con exclusión de las correlaciones epistémicas; es preciso rectificar esta situación. Hemos indicado ya que el campo mismo no está enlazado con la experiencia inmediata mediante reglas directas de correlación: valiéndonos de los símbolos de la figura 5.1, está representado por una construcción interpretativa, no del tipo aislado (y, por ello, objetable), sino de uno que permite pasar mediante reglas lógicas (que enlazan un sistema con sus propiedades) a las magnitudes provistas de brazos que se tienden hacia la Naturaleza. Estas magnitudes son **E** y **H**. Las reglas de correspondencia son también definiciones operacionales, a saber, los procedimientos por los cuales definimos **E** y **H** en los cursos de física elemental: en su versión más simple, **E** es la fuerza mensurable sobre una carga unidad, **H** la fuerza mensurable sobre un polo unidad. En vista de la imposibilidad de disponer de polos unidad, y también a causa de la mentalidad práctica del ingeniero electricista, que ha impreso sus puntos de vista de forma cada vez más intensa y, verdaderamente, al por mayor sobre los recientes progresos en esta materia, tendemos ahora a definir **H** por referencia a corrientes eléctricas. Todo esto sería para bien de la ciencia, pues las reglas de correlación deben suministrar el enlace más satisfactorio posible con la experiencia real; observemos, sin embargo, que estas reglas permiten cierto tipo de definición para **E** y **H** y las ecuaciones de MAXWELL, que llevan ya, inherente, otro tipo. (Aparte de mostrar, quizá para desánimo del profesor de física, que las magnitudes científicas son susceptibles de más de una buena definición, esta observación sirve para consolidar el significado de las fuerzas de campo eléctrico y magnético, y volverá a interesarnos de manera más fundamental cuando tratemos del papel general de las definiciones en la ciencia; o sea, en el capítulo XII.)

Las magnitudes **E** y **H** comparten con las velocidades y posiciones de la mecánica la condición de ser las variables básicas, esto es, las variables enlazadas a la Naturaleza por las más simples reglas de correspondencia; pero hay otras variables, relacionadas con ellas de una forma definida, que permiten descripciones igualmente satisfactorias. En lo que se refiere a la mecánica acuden a la mente las variables constituidas por el impulso, el ángulo y la acción; y, análogamente, los potenciales vectoriales y escalares se utilizan con frecuencia para provecho de la electrodinámica: las ecuaciones de MAXWELL asumen una forma

particularmente atractiva cuando se los hace intervenir. Para evitar la ambigüedad, sin embargo, es necesario complementar las ecuaciones resultantes con ciertas condiciones foráneas (como la invariabilidad del aparato de medición).

A modo de conclusión, parece indicado un breve comentario sobre el uso de los campos en otras partes de la ciencia. Como consecuencia de su éxito en la electrodinámica, la idea del campo ha invadido la mecánica, donde se utiliza con frecuencia la expresión *campo de fuerzas;* pero su aplicación se limita a los problemas estáticos, en los que no pueden desplegarse las ricas potencialidades de un continuo con propiedades dependientes del tiempo. Los campos gravitatorios, por ejemplo, se tratan en gran medida como campos estáticos, y se sabe muy poco acerca de cosas tales como la velocidad de propagación de la influencia gravitatoria. En la hidrodinámica, donde el sistema es un medio continuo material, muy semejante al tratado en la sección precedente pero con propiedades enteramente diferentes (densidad de masa y vectores de flujo), el concepto de campo adquiere mayores alcance y alambicamiento.

No podemos examinar aquí los diversos campos biológicos[9] que adoptan características apropiadas tomándolas de varios tipos físicos, en un esfuerzo por explicar la organización y el crecimiento. Una grave dificultad existente en la mayoría de ellos es que no son capaces de advertir claramente los requisitos metodológicos que involucran: es de esperar que nuestro análisis haya mostrado que, para tener éxito, deben: *a*) definir inequívocamente un conjunto necesario y suficiente de variables de estado, y *b*) enunciar las leyes que regulen su comportamiento; estas leyes pueden ser las ya reconocidas en alguna disciplina física o pueden ser *sui generis;* pero tienen que estar siempre claramente formuladas.

Reviste especial interés el intento de H. S. BURR y F. S. C. NORTHROP[10] por poner en correlación las pautas de crecimiento de los organismos vivos con los campos electrostáticos de su entorno. La tesis de estos investigadores es que las influencias que imponen "configuraciones" especiales a los constituyentes moleculares del tejido vivo son de naturaleza física y exigen el mismo tratamiento que los campos de la electrodinámica ordinaria.

---

[9] Por ejemplo, la entelequia de Driesch (H. DRIESCH: *Analytische Theorie der Organizationsentwicklung,* W. Engelmann, Leipzig, 1894); el organizador de Spemann (H. SPEMANN: *Embryonic Development of Induction,* Yale University Press, New Haven, Conn., 1928) o los campos embrionales (P. WEISS: "Morphodynamische Zelltheorie und Genetik", *Verh. 5. Internat. Kongr. Vererbungswiss.,* 2, 1928).

[10] H. S. BURR y F. S. C. NORTHROP: *Quarterly Rev. Biol.,* 10:322 (1935). H. S. BURR: *Scientific Monthly,* 64:217 (1947). Para algunas observaciones sobre los aspectos físicos de esta obra, véase H. MARGENAU: *Scientific Monthly,* 64:225 (1947).

RESUMEN

La mecánica de los medios continuos tiene dos subdivisiones principales: la mecánica de los medios materiales y la teoría del campo electromagnético. El presente capítulo estudia qué es lo que se designa en estas dos ramas por el sistema, sus observables y sus estados; de este modo sometemos a consideración con cierto detalle el carácter de las leyes del movimiento, que revisten aquí la forma de ecuaciones diferenciales parciales, y la naturaleza de sus soluciones. Nos permitimos, finalmente, unas breves reflexiones sobre el uso del concepto de campo en las ciencias no físicas.

BIBLIOGRAFIA

HEITLER, W.: *The Quantum Theory of Radiation,* Nueva York, Oxford University Press, 1944.

JOOS, G.: *Theoretical Physics* (traducido por Ira M. Freeman), Glasgow, Blackie & Sons, Ltd., 1934.

LAMB, H.: *Hydrodynamics,* Nueva York, The Macmillan Company, 1945.

MAXWELL, J. C.: *A Treatise on Electricity and Magnetism,* Nueva York, Oxford University Press, 1873.

PAGE, L., y ADAMS, N. I.: *Electrodynamics,* Nueva York, D. Van Nostrand Company, Inc., 1940.

PFEIFFER, F.: "Elastokinetik", *Handbuch der Physik,* vol. 6, *Mechanik der elastischen Körper,* Berlín, Springer-Verlag, 1928.

SCHELKUNOFF, S. A.: *Electromagnetic Waves,* Nueva York, D. Van Nostrand Company, Inc., 1943.

SMYTHE, W. R.: *Static and Dynamic Electricity,* Nueva York, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1939.

STRATTON, J. A.: *Electromagnetic Theory,* Nueva York, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1941.

TREFFTZ, E.: "Mathematische Elastizitätstheorie", *Handbuch der Physik,* vol. 6, *Mechanik der elastischen Körper,* Berlín, Springer-Verlag, 1928.

WHITTAKER, E. T.: *A History of the Theories of Aether and Electricity,* Londres, Longmans, Roberts and Green, 1910.

CAPITULO XI

LA TERMODINAMICA

11.1. El método de la termodinámica

La termodinámica es la más empírica de las ciencias físicas. No queremos decir con ello que se trate de una mera masa de hechos coordinados mantenidos juntos por su validez observacional: en realidad, la estructura de sistemas, observables y estados, se halla impresa con extraordinaria firmeza sobre la termodinámica, y el avance de esta ciencia es debido a una atención muy meticulosa a estos elementos metódicos. Su carácter empírico procede del hecho de que versa sobre una amplia clase de sistemas cuyas leyes no son idénticas en detalle ni derivables de ninguna fuente común, sino que es preciso acomodarlas a las observaciones. O, por decirlo de otra manera: las leyes de la termodinámica[1] no gozan de la generalidad lógica de que disfrutan las leyes de la electrodinámica, diferencia que se pone de manifiesto exteriormente en su forma, pues, en vez de ser ecuaciones diferenciales, son relaciones primitivas entre las variables de un estado; y este hecho alcanza su plena significación si recordamos que las ecuaciones diferenciales engendran *clases* de ecuaciones primitivas: las leyes de la termodinámica, siendo ecuaciones primitivas particulares, tienen, por lo tanto, un orden de generalidad inferior al de las leyes del movimiento. Vamos a hacer ahora más explícitas —y, esperamos, más significativas— estas observaciones preliminares.

Los sistemas de la termodinámica son cuerpos ordinarios con fronteras espaciales claramente definidas, y nuestro interés se centra en su reacción ante los diversos modos de calentarlos. Los sistemas típicos son gases, líquidos, mezclas de gases y líquidos encerrados en recipientes con volúmenes fijos o variables, y cuerpos sólidos.

Limitaremos casi exclusivamente nuestra atención al sencillo ejemplo de una única sustancia existente en una única fase, como un gas en una vasija; esto nos permitirá ver los detalles esenciales del método sin que nos incomoden todas las peculiaridades de casos más complejos. Los químicos están acostumbrados a clasificar los sistemas según el número de *componentes* (clases diferentes de sustancia) y *fases* (partes

[1] No nos referimos con esto a las llamadas "primera" y "segunda" leyes de la termodinámica, que no son leyes, sino principios en el sentido utilizado por nosotros. Véase más adelante.

homogéneas de la masa total, separadas del resto por fronteras identificables) que se hallen presentes: así, una solución acuosa de azúcar en agua (en ausencia de vapor de ésta) es un sistema de dos componentes y una fase; y una mezcla de hielo, agua y vapor es un sistema de un solo componente y tres fases. Cada clase de sistema tiene su propio grupo de variables de estado. Lo que vamos a estudiar es, en términos técnicos, un sistema de un componente con una sola fase.

Si quisiéramos, podríamos definir tal sistema como el que es capaz de descripción por dos propiedades, u observables, siendo éstos de tipo poseído—frente al latente—. Pero sucede que el experimento nos proporciona fácilmente información acerca de un número de variables interesantes mayor del que se necesita para una descripción concisa del sistema; de ahí que la termodinámica opere con una profusión de variables de estado, y su tarea resida en determinar una dada valiéndose de otras. Nuestro sencillo sistema queda completamente descrito por su presión (P) y su volumen (V); dicho de otro modo: existen leyes que permiten someter a comprobación todos los hechos que las conciernen cuando están dadas estas dos cantidades. P y V definen, por tanto, un *estado;* sin embargo, aunque suficientes, no son los únicos portadores de la máxima información termodinámica: algunas otras cantidades, como la temperatura (T) y la entropía (S) lo hacen también. Así, pues, es posible, observando más de dos variables, superdeterminar el estado de un sistema; y la termodinámica hace de esta circunstancia virtud, ya que utiliza la superdeterminación para elaborar sus leyes.

La ley se denomina ecuación de estado. Para nuestro sencillo ejemplo la escribimos de la forma acostumbrada, en la que se ponen en relación P y V con T: $f(P, V, T)=0$. (La función f, con argumentos P, V y T, es distinta para gases diferentes; así, el lector recordará que su forma para el gas ideal es $(PV/RT)-1$, siendo R la llamada "constante de los gases perfectos".) Mediante transformaciones adecuadas puede escribirse una relación de esta naturaleza para tres variables de estado cualesquiera, por ejemplo $\varphi(V, T, S)=0$. En la introducción, al decir que las leyes diferían en los detalles para sistemas diferentes, hemos aludido a la variación de f o de φ a medida que pasamos de un sistema a otro; también ahora quedará claro en qué sentido son relaciones primitivas entre las variables y no ecuaciones diferenciales.

Desde el punto de vista de la elegancia conceptual, esta especificidad representa un defecto. El matemático se sentiría mucho más complacido si las leyes pudieran escribirse en forma diferencial, de la que fuera posible extraer, mediante integración y ajuste de constantes, leyes especiales para los distintos sistemas; desgraciadamente, la naturaleza no se ha plegado a sus deseos, y es poco probable que llegue a hacerlo. Por esta razón, fundamentalmente, muchos científicos consideran la termodinámica como una disciplina de menor pureza o como una ciencia que comienza con variables inapropiadas y se embaraza, por tanto, con pesados impedimentos, y conceden un rango superior a la mecánica es-

tadística, que no padece estos defectos y, no obstante el uso de ciertas suposiciones no mecánicas, es capaz de proporcionar fórmulas que constituyen unos análogos de las leyes termodinámicas (es posible, incluso, deducir la forma exacta de la ecuación de estado tanto para los gases ideales como para algunos no ideales). Pese a ello, decidimos tratar aquí la termodinámica como una rama autosuficiente de la ciencia y analizar su método sin prejuzgar su puesto final dentro de la jerarquía de las ciencias.

Si hubiéramos examinado una clase más complicada de sistemas habríamos visto la necesidad de introducir un número mayor de variables independientes y, por tanto, una representación distinta de sus estados. Una de las grandes aportaciones de J. W. GIBBS al tema que tratamos fue el descubrimiento de leyes relativas a sistemas de muchos componentes; y demostró que era necesario incluir entre las variables de estado las masas de los distintos componentes, además de P y V, con lo que la ecuación de estado se convierte en una relación entre P, V, las masas y alguna otra variable. Si están presentes fuerzas eléctricas, magnéticas o gravitatorias, es menester introducir nuevas propiedades; en un cristal la presión pierde su función como variable de estado y hay que sustituirla por variables de tensión, etc.; sin embargo, el método básico de obtener leyes a través de una superdeterminación empírica de estados continúa siendo el mismo.

Los lectores versados en la materia preguntarán probablemente: ¿es verdaderamente peculiar de la termodinámica este método de obtener leyes?; ¿no son igualmente debidas a una superdeterminación de estados las leyes de la mecánica? Tenemos que examinar con detenimiento estas cuestiones.

Frente a la postura que pasa por alto la existencia de una distinción se halla la forma de las leyes: en la mecánica son ecuaciones diferenciales, en la termodinámica no; y no es posible extraer ecuaciones diferenciales directamente de la observación, del mismo modo que tampoco las proposiciones universales pueden *extraerse deductivamente* de las particulares. En favor de la postura disidente puede argüirse del siguiente modo: un grupo suficiente de variables de estado en la mecánica de partículas es x, y, z, v_x, v_y, v_z; otro grupo suficiente es x, y, z, p_x, p_y, p_z, siendo las p las componentes del impulso lineal (o ímpetu); si la observación determina ambos grupos, parece que pueden establecerse relaciones "empíricas" entre velocidad e impulso del mismo modo que la ecuación de estado en la termodinámica.

Esta aparente semejanza se desvanece, sin embargo, cuando profundizamos un poco más en el examen. Pues, en primer lugar, la relación entre velocidad e impulso, o cantidad de movimiento, $p_x = mv_x$, *no* es la ecuación del movimiento y carece de fertilidad para predecir estados mecánicos: es una especie de relación auxiliar que permite escribir de forma más sencilla las verdaderas ecuaciones de movimiento. Más significativo todavía es el hecho de que el impulso no sea una observable

independiente, sino que se constituya a partir de m y v. Cierto que p puede ser medido directamente, pero sólo *mediante la utilización de la ley de Newton,* que no puede asentarse por mediciones de p y v.

La situación es distinta en la termodinámica: en ella P, V y T, son mensurables independientemente mediante procedimientos experimentales sin relación entre sí. Cada magnitud se refiere a la Naturaleza a través de sus propias reglas de correspondencia, y la relación entre tales magnitudes queda establecida sin intromisión de ninguna otra consideración: ésta es la principal razón para llamar a la termodinámica una ciencia empírica. Consideramos legítima, por lo tanto, la distinción que hemos hecho entre mecánica y termodinámica.

Resulta curioso que la ecuación de estado, pese a ser nuestra ley básica, no contenga la coordenada temporal; y ello plantea la importante cuestión referente al modo en que predice estados. Nos enfrentamos aquí con otra radical diferencia respecto a las demás ramas de la ciencia física: *la termodinámica no está interesada en la predicción temporal;* por consiguiente, su finalidad ha de verse en la "predicción" de variables desconocidas sobre la base de un grupo de variables conocidas, referidas todas al mismo estado (y se parte del supuesto de que éste persiste indefinidamente en el tiempo).

Semejante procedimiento sólo es posible para las especiales condiciones del sistema que no cambien en el tiempo o que cambien con infinita lentitud; por consiguiente, la termodinámica sólo es aplicable a los estados llamados estados de equilibrio, definidos por el precedente requisito, o—con algo más de generalidad—a los cambios cuasi-estáticos[2]. Es bien sabido que sus leyes no dicen nada acerca de la velocidad con que se verifican los procesos térmicos, aunque indican su dirección y su meta final; en cierto sentido, pues, nuestro tema de estudio permite, en pequeña medida, certa predicción temporal. Volviendo a nuestro gas, supongamos, por ejemplo, que P y V (y, de ahí, T) estén dados; entonces será posible obtener de la ecuación de estado el valor que cualquiera de estas variables adoptará mucho tiempo después de que hayan cambiado las otras dos.

En la mecánica el tiempo es una variable independiente. Las ecuaciones de la termodinámica, en cambio, no discriminan entre las cantidades que describan un estado hasta el punto de permitir que una de ellas se considere como independiente; por ello, tales ecuaciones no contienen una variable independiente en sentido propio; puede elegirse cualquiera, a voluntad, como independiente. Tal libertad impone a las ecuaciones de la termodinámica, cuando aparecen escritas como diferenciales, la incómoda forma peculiar que tan bien conocen todos los estudiosos de esta materia; pues no sólo obliga al uso de derivadas parciales—cosa que sucede en muchas ciencias—, sino que la necesidad de expresar cuál

---

[2] Término técnico para designar cambios muy lentos, denominados a veces inexactamente cambios reversibles.

de varias variables se considera como independiente añade subíndices poco decorativos a las derivadas.

11.2. Los principios de la termodinámica

Hemos visto que las leyes de la termodinámica, que aquí hemos supuesto que eran las ecuaciones de estado de los diversos sistemas, son menos generales que su contrapartida en otras ciencias. Sin embargo, su tema tiene una meta universal, y posee un grado de elegancia exclusivamente propio: por paradójico que pueda parecer a primera vista, ello proviene de unos principios que operan por encima del plano de las leyes, principios incapaces por sí mismos de engendrar éstas, pero capaces de darles alcance y substancia. Los solemos denominar "Leyes de la Termodinámica" por razones históricas; puesto que funcionan como leyes superiores en el sentido que vamos a explicar seguidamente, nos referiremos a ellas con la palabra Leyes (en mayúscula); y carecen de toda analogía en la mecánica y en la electrodinámica.

Ley I. La primera Ley se expresa a menudo diciendo: el calor es una forma de energía, y la energía se conserva. No puede decirse que sea afortunado un enunciado tan tosco de la Ley, a pesar de que suela admitírselo: por ser correcto sólo a medias y por decir algo bastante fáctico, ahoga toda investigación sobre un significado más preciso de los principios de la termodinámica, pues, en realidad, constituye una pura tautología carente de interés, a menos que se dé una fórmula independiente por la que se pueda calcular la energía contenida en un cuerpo calentado. En mecánica, la ley de conservación de la energía tiene gran importancia, porque poseemos fórmulas definidas para calcular las diversas clases de energía que pueden aparecer (*v. gr.*, energía cinética y potencial), y cuyo equilibrio podemos comprobar por procedimientos empíricos; en termodinámica, sin embargo, el teórico carece de tales medios: inventa formas de energía como calores latentes, calores de formación, de absorción, etc., cuando sus ecuaciones no consiguen alcanzar el necesario equilibrio. ¿Qué es, entonces, lo que salva de ser trivial a la primera Ley?

No puede darse contestación a esta pregunta a menos que se preste atención a la clase de análisis realizado en este capítulo; pues la contestación implica que comprendamos lo que se designa con el nombre de variables de estado y las reglas de correspondencia que enlazan estas variables con la Naturaleza. Y tampoco puede darse sin producir cierto desagrado a quienes detestan el simbolismo matemático; lo que queremos es, sin embargo, minimizar su desagrado y proporcionar, con todo, una contestación.

Cualquier aplicación de la primera Ley involucra tres magnitudes relativas al sistema sometido a consideración. Se supone que este sistema experimenta una modificación, por ejemplo, una expansión o un cambio

de temperatura o de presión, y que tales modificaciones podrán detectarse por observadores que escruten las fronteras del sistema (se admite que el interior es inaccesible a todo inspección): así se observan dos de las magnitudes en cuestión, a saber: el calor absorbido por el sistema, ΔQ, y el trabajo realizado por él, ΔW. A través de definiciones operacionales que conllevan una referencia a ciertos instrumentos (termómetros, manómetros, aparatos para medir volúmenes, etc.), es perfectamente posible determinar ΔQ y ΔW; pero no ocurre lo mismo con la tercera magnitud que se ha de introducir, el cambio de energía interna, ΔU. De hecho, ΔU queda *definida* por la primera Ley:

$$\Delta U = \Delta Q - \Delta W \tag{11.1}$$

Hasta el momento, pues, este enunciado equivale simplemente a unas instrucciones para determinar una magnitud desconocida, ΔU, que, por su parte, no está relacionada con las propiedades observables del sistema.

Ahora bien: sucede que Q y W no son auténticas variables de estado: si tratáramos de basar sobre ellas una descripción del comportamiento termodinámico, las leyes que planteásemos serían ineficaces, realmente tan ineficaces como si intentáramos estudiar los puntos materiales haciendo referencia a colores y olores. Pero la Ley dice, además de la ecuación (11.1), que, pese a esta defección de Q y W, *U es una variable de estado.* En virtud de esta nueva estipulación, la ecuación (11.1) se convierte en algo más que una definición vacía: resulta ya empíricamente comprobable.

Para ver cómo sucede esto escribimos la ecuación (11.1) en su forma diferencial, apropiada para cambios infinitesimales, y nos permitimos un poco de análisis.

$$dU = dQ - dW \tag{11.2}$$

Designemos con $x_1, x_2 \ldots, x_n$ las variables de estado suficientes para la descripción del sistema (dos en el caso de sistema de un componente y una sola fase considerado en la sección anterior, pero, en general, más). Es posible, entonces, escribir

$$dQ = \sum_i q_i \, dx_i$$

$$dW = \sum_i w_i \, dx_i$$

con lo que las q_i y w_i serán funciones de las x_i, puesto que dQ y dW son mensurables. Tendremos entonces

$$dU = \sum_i (q_i - w_i) \, dx_i. \tag{11.3}$$

Mas si U es una variable de estado, dU es una diferencial exacta; recurriendo ahora a un teorema debido a CAUCHY, que dice: si

$$dX = \sum_i X_i \, dx_i$$

es una diferencial exacta, los coeficientes X_i satisfacen las relaciones

$$\frac{\partial X_i}{\partial x_j} = \frac{\partial X_j}{\partial x_i} \qquad i, j = 1, 2, \ldots, n$$

basta aplicar este teorema a la ecuación (11.3) para obtener

$$\frac{\partial (q_i - w_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial (q_j - w_j)}{\partial x_i} \qquad i, j, = 1, 2, \ldots, n. \tag{11.4}$$

Puesto que estas relaciones representan identidades cuando $i=j$, su número es igual al número de parejas que pueden formarse con n cosas, a saber: $n(n-1)/2$; y el número de magnitudes medidas, las q_i y w_i, será $2n$. Hemos extraído así del inocente postulado de que U es una variable de estado auténtica una serie de ecuaciones que pueden comprobarse experimentalmente; y su enunciado inicial, que hace aparecer a la Ley I como principio de conservación de la energía, yerra por completo su objetivo o subestima su fertilidad.

Como hemos puesto de manifiesto, de las leyes de la mecánica y de las de la electrodinámica, pueden extraerse los teoremas de conservación, que, por lo tanto, equivalen a tales leyes. En el caso presente, la primera Ley no se puede extraer de las ecuaciones de estado que funcionan como leyes en la termodinámica, pero engendra relaciones del tipo (11.4) que entran en útil colaboración con las leyes mismas.

Gran parte del atractivo intrínseco de la termodinámica proviene del correcto uso que esta ciencia hace de las sutilezas de método, de la forma en que aprovecha incluso fracciones indeterminadas de conocimiento tales como si una propiedad dada describe o no un estado. Esta orientación metodológica parece, realmente, ser peculiar de la termodinámica [3].

Ley II. La primera Ley proporciona el entramado *cuantitativo* de los cambios termodinámicos: dice esencialmente en cuánto se alterará numéricamente en un proceso el valor de una magnitud dada; pero es indiferente a la dirección en que se verifique el proceso, cosa que puede verse fácilmente mediante la ecuación (11.1); pues si a cada símbolo que allí aparece se le diera signo negativo, la ecuación continuaría, evidentemente, siendo verdadera. Como es natural, esta es una característica co-

[3] En todos los campos es corriente la *aparición* de propiedades que no son variables de estado: así, en la mecánica, nuestra ciencia modelo, no empleamos colores ni olores, ya que son demasiado irrelevantes para el problema, sino que utilizamos energías cinéticas, que no son variables de estado auténticas, ya que estados distintos pueden tener la misma energía cinética. Sin embargo, observamos aquí otra importante diferencia: en mecánica el mismo estado comporta siempre la misma energía cinética; en termodinámica el mismo estado puede corresponder a toda una variedad de Q y de W.

mún a todas las ecuaciones, no sólo de las de la termodinámica; ¿por qué, entonces ha de preocuparnos aquí y no en la mecánica o en la electrodinámica?

Extrañamente, la indiferencia a la dirección se halla apoyada por la experiencia en las dos últimas disciplinas, pero no en la termodinámica: en mecánica, por ejemplo, el principio de energía exigiría que ΔE(cinética)$= -\Delta E$(potencial); aplíquese esta ecuación a un péndulo en movimiento de oscilación y se verá que, cuando se mueve hacia el centro, el primer miembro es positivo y ΔE(potencial), como corresponde, negativo, mientras que cuando el péndulo se aleja de su centro lo correcto es elegir los signos opuestos; por ello se presentan *ambas* posibilidades. Consideremos ahora un ejemplo termodinámico, el flujo de calor desde un cuerpo caliente a un cuerpo frío, que es una de las aplicaciones más sencillas de la ecuación (11.1). Aquí el sistema comprende ambos cuerpos; Q es la suma del calor absorbido por el cuerpo caliente y del absorbido por el cuerpo frío, $Q=\Delta Q_1+\Delta Q_2$; también ΔU y ΔW son ambas cero: la ecuación, por tanto, dice que $\Delta Q_1=\Delta Q_2$; ahora bien, puesto que el calor fluye desde el cuerpo 1 (caliente) al frío, 2, ΔQ_1 es negativo y ΔQ_2 positivo; pero el calor nunca fluye desde los cuerpos fríos a los calientes en un sistema aislado, y de ahí que no se produzca nunca la otra elección de signos.

Esta unilateralidad o irreversibilidad es cierta predicada de todos los procesos termodinámicos que se producen naturalmente, pero no está implicada por la primera Ley; la segunda, en cambio, la postula de un modo sucinto e inequívoco. Cualitativamente, la Ley II es un refinamiento y generalización de la proposición: el calor no fluye desde temperaturas bajas a temperaturas más altas (obsérvese que el agua fluye hacia arriba si posee suficiente velocidad en la parte baja); hay varias maneras de enunciarla, pero como no vamos a hacer un uso específico de ella, presentamos la formulación más sencilla, a base de la *entropía* y omitiendo detalles. La entropía es una variable auténtica de estado y una magnitud mensurable[4]; para muchos estudiosos de la ciencia, es algo muy abstracto, algo estrechamente relacionado con las probabilidades; pero esta actitud representa un inadecuado enfoque de la termodinámica, en la que la entropía goza del mismo *status* que la presión y la temperatura: este concepto tendría significado incluso aunque nunca se hubieran inventado las probabilidades, por lo cual rogamos al lector filosófico que aleje en este punto toda asociación con bolsas de fichas mezcladas o mazos de cartas barajadas si desea una visión correcta de las cosas; la entropía es una cosa tan definida y clara como otras muchas magnitudes termodinámicas. Teniendo esto presente, procedamos a enunciar la segunda Ley del modo siguiente: la entropía de un sistema cerrado no disminuye nunca.

Para el observador reflexivo es fuente de asombro y de satisfacción

[4] Su conocida definición epistémica es: la variación de entropía es igual al calor adquirido dividido por la temperatura a la que se transmita el calor.

a la vez el que un enunciado tan simple abarque toda la gama de fenómenos irreversibles. Da igualmente explicación a los hechos de que el calor no fluya hacia arriba, de que un trasatlántico no pueda obtener su fuerza impulsora del calor del océano, de que un refrigerador no pueda funcionar sin un motor y de que las moléculas rápidas de un gas no puedan ser separadas de las lentas. Cuando se combina la segunda Ley con la primera y se hace uso de la "exactitud" de dU, que hemos puesto de manifiesto en la sección precedente, puede obtenerse un vastísimo despliegue de útil información, cuya exposición constituye la mayor parte de los tratados de termodinámica.

La concepción acostumbrada ve una peculiar aura de duplicidad en torno a la verdad de la segunda Ley. Se supone en cierto modo que la segunda Ley no es literalmente verdadera, sino *sólo sumamente probable,* y que poseería una peculiar y precaria condición; para muchas mentes, sin embargo, es el prototipo de todas las leyes, porque declara honestamente su contenido como probable, como debería hacer cualquier proposición física que se respete. Estos escépticos sostienen, por otra parte, que la forma categórica de las leyes mecánicas constituye un atentado contra el código de la ciencia o, en el mejor de los casos, que es una versión simplificada de lo que debería ser una ley. ¿Por qué la segunda Ley de la termodinámica suscita toda esta cautela, toda esta circunspección epistemológica, cuando las ecuaciones de la mecánica no provocaban en nosotros escrúpulos análogos?

Esto se debe a una incoherencia en nuestra actitud básica. Nos es difícil mantener fija la mirada sobre la termodinámica y sentimos la tentación de desviarla más allá de sus fronteras. Como ya se ha indicado, existe otra rama de la ciencia, conocida por el nombre de mecánica estadística (cf. el capítulo XIV), que pretende introducirse en la termodinámica con la esperanza de acabar por explicarla; y no pocas confusiones se deben a haber tomado una por la otra. Estamos posponiendo el estudio de la mecánica estadística hasta que una exposición de la teoría de las probabilidades haya preparado el terreno para ello, pero con objeto de resolver el problema con que ahora nos enfrentamos vamos a exponer ahora unos cuantos hechos relevantes.

Utilizando las leyes de la mecánica juntamente con ciertas hipótesis que participan de la naturaleza de las reglas de correspondencia entre probabilidades y observaciones (y, por ello, conceptualmente diferentes de todos los principios mecánicos), la mecánica estadística es capaz de definir una cantidad cuyo comportamiento matemático es *estadísticamente* el mismo que el de la entropía en la termodinámica: llamemos S a la entropía y S' a su análogo estadístico; pues bien, la segunda ley dice categóricamente que $\Delta S \geq 0$, y la mecánica estadística dice que $\Delta S' \geq 0$ con una *probabilidad aplastante.*

Pero, ¿vamos a identificar S y S'? Pueden adoptarse aquí dos posturas perfectamente legítimas. Una de ellas consiste en afirmar la autonomía de la termodinámica. Evidentemente, no preguntamos si la ecuación de

MAXWELL puede extraerse de la mecánica de partículas: el éxito de la electrodinámica y la artificiosidad de todos los intentos por deducirla de la mecánica nos predisponen a considerar verdaderas las ecuaciones de MAXWELL sin necesidad de justificación ulterior alguna. Si estamos dispuestos a considerar con la misma benignidad a la termodinámica, la segunda Ley es tan verdadera como las leyes de la mecánica.

Mas existe, después de todo, la inquietante posibilidad de *casi* dar razón de la segunda Ley mediante razonamientos mecánicos, cosa que nos induce a extrapolar tal éxito parcial y a decir que, en definitiva, puede descubrirse que S y S' son idénticos. La validez de la segunda Ley se convierte entonces solamente en una cuestión de una elevada probabilidad: el recipiente de agua sobre el fuego tiene una probabilidad extremadamente pequeña, pero finita, de helarse; y, cosa más sorprendente aún, un trozo de hierro al rojo arrojado en un recipiente de agua, después de enfriarse y calentar el agua, podría, una vez cada muchísimo tiempo (un tiempo mucho mayor que los dos o tres billones de años que lleva existiendo nuestro universo), volver a calentarse de nuevo, dejando el agua más fría, y saltar fuera con la ardiente incandescencia. Prácticamente, desde luego, la postura adoptada ante este problema carece de importancia.

Hemos mostrado que no existe ninguna ambigüedad *lógica* en la situación: las premisas de los dos puntos de vista son perfectamente claras y distintas. Sobre todo, es imposible extraer inferencias del aspecto probabilitario de la segunda Ley acerca de los aspectos probabilitarios de otras leyes de la naturaleza: empresa cuya falacia se hace evidente cuando se comprende que la segunda Ley habla de probabilidades *si las leyes mecánicas son exactas*. Así, pues, quien quiera defender el carácter inductivo—y, por consiguiente, no categórico—de todas las proposiciones acerca de la experiencia no debe tomar la segunda Ley de la termodinámica como punto de partida. Mi propia preferencia quedó expresada en el capítulo VI; considero más sencillo y mucho más en armonía con los procedimientos de las ciencias exactas localizar las incertidumbres en el terreno de la experiencia, dejando exactas las leyes: parece haber muy poca necesidad de hacer un revoltijo con aquellas dos construcciones interpretativas y la Naturaleza.

11.3. MIRANDO HACIA ATRÁS Y HACIA DELANTE

En los tres últimos capítulos hemos pasado revista a las estructuras básicas de varias ramas clásicas de la física desde la posición conseguida con nuestra distinción entre sistema, observables y estados, que nos parecía metodológicamente útil. No hemos realizado ningún intento artificial de encajar en un molde uniforme todas estas ramas prescindiendo de tan importante clasificación interna; de hecho, en el interior de tal marco las diferencias entre las diversas partes de la física destacan tan

perceptiblemente como sus semejanzas, pues no queremos insinuar que sean iguales los métodos de las diferentes ciencias.

Creo, sin embargo, que hay algo más natural en la distinción propuesta y en la clasificación que se basa en el *contenido* de las ciencias. A uno le gustaría reclamar para ella la clase de superioridad que tiene el sistema natural de botánica sobre el recuento de estambres practicado por LINNEO.

La selección de temas de los capítulos precedentes ha sido realizada con el deseo de abarcar el ámbito de las ciencias físicas lo más completamente posible sin introducir ideas que necesiten ser aclaradas antes de usarlas. Las ideas que no queríamos introducir son las relacionadas con el cálculo de probabilidades; esto nos ha obligado a dejar de lado la mecánica estadística, rama cada vez más importante de la química moderna, y la mecánica cuántica, que abraza, de modo parecido, tanto la física como la química. Nuestro programa futuro consiste en preparar la escena para ellas; pero antes incluso de abordar las probabilidades, tema sumamente controvertido, es necesario que estudiemos un problema cuya omisión parece haber suscitado la mayor parte de esas controversias: se trata del papel general desempeñado por las *definiciones* en una ciencia exacta, cosa que estudiaremos en el capítulo siguiente.

Un libro, como un edificio público, debe tener salidas de emergencia. Aquí ofrecemos una para el lector que se sienta impaciente por encontrar el significado de la realidad: puede, si lo desea, saltar por encima de los capítulos siguientes, descender para echar un rápido vistazo a los dedicados a la mecánica cuántica, y, luego, leer el capítulo XV y el último capítulo del libro.

RESUMEN

La termodinámica es una ciencia peculiar en muchos aspectos: su sistema posee una gran variedad de formas; sus observables pueden variar de sistema a sistema; sus leyes (ecuaciones de estado) son ecuaciones primitivas entre las variables de estado, no ecuaciones diferenciales, como sucede en otras partes de la física. La termodinámica es la más "empírica" de todas las ciencias exactas y llega a sus leyes por superdeterminación de estados.

Las llamadas Leyes de la Termodinámica son principios que operan por encima del plano de las leyes ordinarias. Las explicamos, prestando considerable atención a la frecuente actitud que considera como verdadera la segunda Ley de la Termodinámica en una abrumadora mayoría de casos observados, pero no verdadera en el sentido de las leyes de la mecánica.

BIBLIOGRAFIA

BRIDGMAN, P. W.: *The Nature of Thermodynamics,* Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1941.

EPSTEIN, P. S.: *Textbook of Thermodynamics,* John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1937.

FERMI, E.: *Thermodynamics,* Prentice-Hall, Inc., Nueva York, 1937.

PLANCK, M.: *Treatise on Thermodynamics,* Longmans, Roberts y Green, Londres, 1903, [hay vers. castellana].

ZEMANSKY, M. W.: *Heat and Thermodynamics,* McGraw-Hill Book Company, Inc., Nueva York, 1943 [vers. cast.: *Calor y termodinámica,* Madrid, Aguilar, 1961].

CAPITULO XII

EL PAPEL DE LAS DEFINICIONES EN LA CIENCIA

12.1. Sobre la unicidad de las definiciones

El científico se enorgullece de la claridad y precisión de los conceptos que emplea. Muchas mentes ven en el pensamiento y en la palabra precisos y exactos la característica fundamental de toda ciencia, y el credo profesional del físico y de sus intérpretes es que no se debe utilizar ningún término que no esté claramente definido; como la mayoría de los credos, sin embargo, esta expresión ha quedado vacía por habérsela proclamado irreflexivamente en ocasiones.

Lo sucedido con respecto a las definiciones en los últimos años puede resumirse del modo siguiente: para garantizar la claridad y la precisión, los científicos han hecho lo que parece obvio a primera vista: han insistido en que todo concepto se defina de una forma única; entonces, al comprobar que existen realmente numerosas definiciones aceptables de algunos conceptos físicos (ya que, después de todo, carece de importancia fundamental que definamos el tiempo por referencia al sol o al péndulo de un reloj) se sintieron perplejos al principio; pero pronto, con obstinada determinación, varios influyentes filósofos y científicos decretaron la eliminación de las definiciones defectuosas, dejando sólo *Zourdnungssätze* (Carnap), definiciones operacionales (Bridgman), y cosas semejantes. Luego han surgido muchas controversias en torno a la cuestión de cuál de las varias definiciones de una magnitud física dada (la fuerza es una víctima favorita) es realmente la apropiada, y los profesores de física se han dividido en grupos, cada uno de ellos fiel a su propio conjunto de fórmulas; al parar mientes en las expresiones tradicionales han advertido que carecen de sentido, y han hecho el sorprendente descubrimiento de que muchos grandes hombres habían caído en juegos de palabras y en circularidades al definir sus términos: incluso Newton cometió el atroz crimen de circularidad al decir que la masa es igual a la densidad por el volumen, pues, ¿qué es la densidad sino la masa por unidad de volumen?

Queremos poner aquí de relieve que no puede existir ciencia exacta alguna bajo la rígida regla de la unicidad de la definición: aplicada consecuentemente, esta regla puede engendrar un cuerpo articulado de conocimientos, como el derecho civil, con sus extrañas pero concretas concep-

ciones [1], o la botánica descriptiva, pero no la unidad orgánica que denominamos ciencia. La ciencia viva, como esperamos demostrar, debe su vitalidad a la fructífera interacción de dos modos diferentes de definición, uno estrechamente relacionado con la teoría y la ley, el otro con las reglas de correspondencia. Antes de tratar en su totalidad estos aspectos positivos, revisemos algunos parciales e imprimamos una tonalidad más específica a la crítica ínsita en las precedentes observaciones.

Lo que hemos denominado regla de unicidad se presenta en dos actitudes conexas, que designaremos aquí por *A* y *B*. La tesis *A*, la fundamentalmente sostenida por los hombres de ciencia, otorga a cada cantidad física *una* y solamente una definición propia; la tesis *B* admite la posibilidad de varias definiciones, pero insiste en que han de ser de *un tipo* determinado. En la presente sección nos ocupamos principalmente de la primera de estas hipótesis.

Ciertas magnitudes físicas, como la longitud, la masa o las intensidades de los campos eléctricos y magnéticos, se prestan fácilmente a sustanciar la concepción *A* y son, por ello, las que casi con exclusividad eligen sus propugnadores para defenderla: la longitud se define en forma única a base de congruencias entre partes de cuerpos rígidos, la masa (relativa) se define como un cociente de aceleraciones, la intensidad de campo como la fuerza sobre alguna entidad unitaria, como masa, carga, o polos unidad. El lector recordará los detalles a que se refieren estas indicaciones [2].

No es posible ocultar las dificultades que se presentan en este sencillo procedimiento: las longitudes no se miden siempre por medio de reglas rígidas, sino muchas veces por medio de ondas sonoras, luminosas o de radar; las masas se determinan usualmente pesándolas y haciendo seguidamente una no declarada conversión de peso a masa; y las intensidades de campo magnético no se hallan nunca en la práctica en virtud de la definición expresada más arriba, debido a la imposibilidad de utilizar los polos magnéticos unidad. Sin embargo, estos hechos no originan ninguna objeción seria a la hipótesis en cuestión, pues continúa siendo posible decir que las definiciones originales son *primariamente* equivalentes a las formas en que se determinan empíricamente las magnitudes físicas (y ello puede demostrarse por transformaciones lógicas y mediante leyes de la naturaleza). Formalmente, pues, puede mantenerse todavía la concepción considerada; pero si se mantiene parece adecuado hacer notar en este punto la intromisión de un nuevo elemento metodológico en el esquema ampliado de definición: las definiciones secundarias necesitan *leyes de la naturaleza* para ser establecidas.

[1] ¡Según el antiguo Derecho austríaco, la mosca es un animal doméstico!

[2] La creencia de que todo concepto físico tiene una sola definición propia goza de gran favor en las aulas, pues inculcarla en un estudiante es dirigir la atención hacia extremos concretos; es un instrumento de gran utilidad pedagógica, y yo, por mi parte, soy responsable de utilizarlo y aconsejarlo en los cursos introductorios. Mas parece justo que uno deba expiar este pecado en cursos avanzados, cuando el estudiante empieza a ver el paisaje de la ciencia, así como los objetos que lo ocupan, tan singularmente definidos.

La concepción *A* se torna más nebulosa en las proximidades de la termodinámica y de la teoría de los *cuantos* (de hecho, en todos los campos en donde falla la visualización). Consideremos una magnitud notoriamente familiar, la temperatura; aquí, la clase de definición generalmente considerada como primaria, que relaciona la temperatura con el valor mensurable de una propiedad común de los objetos (longitud de una columna de mercurio, color de una llama, volumen de un gas), no es única: aunque se elija la misma propiedad (la longitud, por ejemplo), se obtienen diferentes temperaturas para distintas sustancias termométricas. Elegir una sustancia especial, por ejemplo, el mercurio o un gas ideal, se manifiesta ahora como un acto arbitrario que no cumple el carácter de simplicidad que señalaba al cuerpo rígido como específicamente conveniente para definir longitudes. Pero sigue pudiéndose realizar este acto. En tal caso, es preciso forzar de un modo más drástico aún que antes a las leyes de la Naturaleza (¡que son ecuaciones de estado!) a que medien entre las diferentes definiciones de temperatura: si no fuera por tales leyes, no podríamos decir que la proposición que relaciona *T* con la presión de un termómetro de hidrógeno de volumen constante y la proposición que relaciona *T* con la longitud de una columna de mercurio son definiciones de temperatura, pues no definirían la misma magnitud física. Se obtiene así la impresión de que las leyes de la naturaleza tienen gran importancia en algunas definiciones y que debería reconocerse su papel al estudiar el proceso definitorio.

La concepción *A,* que asocia a cada magnitud física una definición única, o, por lo menos, una única definición primaria, representa predominantemente una actitud simplista de escolar por parte de los científicos, y rara vez la sostienen los filósofos. Libre de la especialización que el trabajo científico entraña, el filósofo (así como muchos científicos) contempla de una sola ojeada la diversidad de las definiciones científicas; y para conseguir cierto aspecto de unidad proclama lo que hemos denominado la concepción *B,* a saber: que todas las definiciones, pese a su falta de similitud en los detalles, siguen un *único tipo de procedimiento;* esto es lo que hacen, por ejemplo, CARNAP y BRIDGMAN, que han analizado el método con gran sagacidad. Dedicamos otra sección a un examen crítico de sus aportaciones; aquí nos limitamos a manifestar la opinión de que la concepción *B* se halla afectada de la misma rigidez y falta de articulación que la más primitiva tesis *A*; pero hemos de exponerlo más detenidamente.

12.2. LA DEFINICIÓN DE FUERZA

Antes de abordar la cuestión de la definición en el plano del método conviene estudiar con cierto detalle un ejemplo específico, ejemplo que pondrá de relieve las diversas posiciones que se han adoptado o pueden adoptarse. Elijamos al efecto la magnitud física fuerza, y anotemos cierto

número de definiciones en un orden arbitrario, correspondiente en cierto modo a sus grados de refinamiento, pero sin intentar sistematizarlas.

1.—Figura primero la tosca y precientífica declaración de que la fuerza es la causa del movimiento. Si la mencionamos aquí es, principalmente, para mostrar su insuficiencia y para desalentar su utilización popular. Hubo, desde luego, un tiempo en que esta proposición era satisfactoria, porque se entendía el movimiento, en un sentido muy específico y técnico, como incremento de la velocidad vectorial, y la palabra *causa* significaba el esfuerzo dinámico; el principio de D'ALEMBERT en su forma original (antes de que MACH lo convirtiese en el híbrido que responde ahora a ese nombre) estaba basado en esta definición.

2.—Viene luego la formulación antropomórfica: fuerza es un empuje o un tirón. Se halla en clara relación con el concepto de sensaciones cinestésicas humanas.

3.—Para eliminar el elemento humano se utilizan a menudo procedimientos particulares con el fin de explicar lo que es una fuerza. Uno de los más populares es el de la balanza de resorte: cuando éste queda estirado se dice que el aparato ejerce una fuerza proporcional a su alargamiento. Esta definición presenta la ventaja de permitir una sencilla especificación cuantitativa de la magnitud de la fuerza, y de ahí su medición.

4.—Una fuerza es algo que hace alargarse una balanza de resorte, y su valor puede hallarse conectando el agente productor de la fuerza con el resorte y anotando su alargamiento.

5.—Fuerza es lo que neutraliza un peso, y su medida es el total de peso que mantenga en equilibrio.

6.—La fuerza es un agente que provoca desviaciones del movimiento rectilíneo uniforme en los cuerpos materiales.

7.—La fuerza es el producto de la masa por la aceleración, o, lo que es lo mismo, salvo para velocidades muy grandes (relativistas), la fuerza es la tasa temporal de cambio del impulso, ímpetu o cantidad de movimiento.

8.—En la dinámica superior, magnitudes distintas, tales como la función lagrangiana, la función hamiltoniana o la energía potencial, son a veces conceptos más sencillos que las fuerzas, y sucede que una definición de fuerza a base de ellas puede ser la más práctica. Un ejemplo sería: la fuerza es el gradiente negativo de la energía potencial.

Podríamos ampliar indefinidamente esta lista. Es digna de mención la característica siguiente: una definición dada es frecuentemente capaz de proliferación ilimitada en otras formas que no son meras transformaciones analíticas suyas. ¿Cómo logra este extraño poder?

Independientemente de los puntos de vista ya esbozados en la sección precedente, existe otro respecto al que conviene hacer algunas observaciones. Las definiciones se clasifican a veces en *cualitativas* y *cuantitativas:* las primeras son las que proporcionan una especie de regusto de lo que el concepto *es* o dicen lo que no es; y las segundas permiten fijarlo cuantitativamente. Se observará que las definiciones 1, 2, 6, son

cualitativas en este sentido. Pero no nos engañemos acerca del significado de esta distinción un tanto vulgar, pues debe reconocerse, en primer lugar, que carece de relevancia para aquellas entidades o construciones interpretativas científicas que, por su naturaleza, no pueden ser medidas, y que comprenden la gran clase de los sistemas que tratamos en el capítulo anterior. Un electrón, como entidad distinta de sus propiedades (carga, masa, posición o longitud de onda), posee solamente un significado sustantivo, y la mejor definición a su respecto continúa siendo cualitativa. Por lo que se refiere a las magnitudes (y las fuerzas son magnitudes), una buena definición debe ser, efectivamente, cuantitativa o hacer referencia a procedimientos de medición. Ahora bien: algunas de nuestras definiciones de fuerza son inherentemente cuantitativas (7 y 8), mientras que otras implican una cuantificación instrumental (3, 4, 5). Prestando de nuevo atención a las restantes de las llamadas definiciones cualitativas (1, 2, 6), vemos que deben su carácter de ser cualitativas a un defecto de enunciado o de comprensión, no a una peculiaridad intrínseca: la definición 1 se torna cuantitativa si se definen cuantitativamente causa y movimiento, la 2 si se supone la medición de tirones y empujones (y para el ingeniero mecánico esta definición es enteramente satisfactoria y cuantitativa); en cuanto a la definición 6, adquiere también precisión cuantitiva cuando se hallan los medios de evaluar numéricamente las desviaciones del movimiento rectilíneo uniforme. De ahí que, en un sentido básico, todas las definiciones de nuestra lista tiendan a ser cuantitativas o convertirse en tales. El único tipo de definición que es intrínsecamente cualitativo es denotativo: apuntar a una situación sensorial y pronunciar la palabra *fuerza* es un proceso que *per se* no contiene ningún núcleo susceptible de desarrollarse y dar lugar a ninguna precisión cuantitativa. Por esta razón, las definiciones denotativas no se toleran nunca en las ciencias exactas, excepto en la medida en que el lenguaje las introduzca inevitablemente; todas las definiciones de cantidades son, pues, cuantitativas, al menos en forma rudimentaria, por lo cual vamos a omitir, por el momento, todo comentario ulterior de esta distinción.

Estudiemos ahora nuestra lista a la luz de lo que hemos denominado la tesis de unicidad, que hemos analizado luego separando la concepción A de la B. La primera de ellas aceptaría cualquier definición como modelo y se adheriría a ella con toda determinación. Los ejemplos 2, 3 y 7 han sufrido el impacto de esta actitud; de hecho, el ingeniero y el físico de nuestros esclarecidos tiempos se miran con malos ojos, porque el ingeniero gusta de elegir la definición 2, mientras que el físico prefiere la número 7 (la pugna se libra principalmente entre autores de libros de texto). En ocasiones, ambos bandos aceptan como solución de compromiso la definición 3.

La versión más liberal de la tesis A, que admite una definición primaria y tolera cierto número de definiciones secundarias, o derivadas, está tipificada por la 4 o por la 5, y cada una de ellas puede ser ampliada indefinidamente, dando nacimiento a nuevas medidas de fuerza. Por

ejemplo, podemos enganchar cualquier otro cuerpo elástico al resorte, tirar de él y hallar una correlación entre sus simultáneos alargamientos; o podemos poner en relación las definiciones 4 y 5 observando qué pesos dan origen a unos alargamientos determinados en un resorte normalizado.

Surge ahora el defensor de la concepción B, que sostiene que todas las definiciones físicas tienen que ser de *tipo* similar. Lo más probable es que sea un empirista y elija como satisfactorios los números 3, 4 y 5 de nuestra lista; si se da la circunstancia de que es racionalista preferirá las números 2, 7 y 8; pero raramente permitirá que se mezclen. Habrá que someter los dos "tipos" a ulterior estudio, pero vemos ya una notable diferencia entre ellos: el primero apela directamente a la observación y, en realidad, se torna impotente excepto cuando la definición apoya un pie en la Naturaleza; el segundo funciona sin esa apelación directa: puede decirse que define la fuerza en relación a otras magnitudes (que, a su vez, pueden definirse más directamente mediante observaciones); pero la falta de inmediatez se compensa en cierto modo diciendo *qué* se entiende por fuerza, mientras que las definiciones de tipo más empírico parecen simplemente indicar *cuánta* fuerza se halla presente y dejan el significado interno de tal magnitud vagamente suspendido en el aire.

12.3. El enfoque del empirista

En la filosofía reciente, los empiristas lógicos han sometido al más cuidadoso escrutinio los procesos por los que la ciencia forma sus definiciones. Carnap [3], en particular, ha penetrado fructuosamente en el problema, en la extensión compatible con los límites positivistas de su filosofía. Pasemos revista con algún detalle a sus resultados.

La formación de los conceptos físicos, según Carnap, se desarrolla en tres fases, la cualitativa, la cuantitativa y la abstracta. El primer estadio comprende la evolución de conceptos fundamentalmente precientíficos, tales como cosas con propiedades constantes, y Carnap sostiene que las cosas y sus propiedades se reconocen y definen por inducción (más adelante volveremos sobre este punto y sobre lo que él concibe que es una cosa): toda propiedad de una cosa es su modo de reaccionar ante ciertas condiciones; la constancia o permanencia de las propiedades no está dada, sino que se infiere de las observaciones.

El estudio de Carnap afecta en su mayor parte a la fase cuantitativa, al establecimiento de magnitudes físicas mediante definición. Una magnitud física carece de significado excepto a través de las formas en que pueda ser medida: su significado (*Sinn*) se agota en la circunstancia de que a objetos definidos se adscriban números definidos. La definición

[3] R. Carnap: *Physikalische Begriffsbildung*, G. Braun, Karlsruhe, 1926.

de una magnitud física es la fijación de reglas mediante las cuales se consigue esta asignación de números, y la lógica de tal asignación es lo que CARNAP desarrolla con impresionante claridad.

Existe una distinción entre la definición topológica y la métrica de las magnitudes físicas. Aquélla pretende saber cuándo dos objetos tienen el mismo valor en cuanto a una magnitud dada, cuándo uno tiene más y cuándo tiene menos: para establecerlo, el científico debe hallar dos relaciones entre los objetos, una que sea transitiva y simétrica, y otra, transitiva y asimétrica; la primera permite la especificación de la igualdad, la otra el signo de una diferencia. Cabe señalar aquí que, por lo que a la física se refiere, las definiciones topológicas son más bien académicas (prescindiendo por el momento de las magnitudes para las que no es posible dar una definición métrica).

Al formar una definición de este último tipo, el métrico, el físico hace tres cosas: a) elige la forma de la escala sobre la que quiere medir la cantidad; b) elige el punto cero sobre esta escala, y c) elige una unidad de medida. Un ejemplo ilustrará la cuestión: si se ha de medir la temperatura, T, por ejemplo anotando la longitud, l, de una columna de mercurio, es preciso: a) decidir qué clase de función del argumento l ha de ser T; b) a qué temperatura llamaremos cero, y c) cuántos grados habrá entre el punto cero y algún otro punto fijo de la escala.

El significado de este análisis, expresado más sucintamente, es el siguiente: se quiere establecer una función relacional, $T=f(l)$. Esto exige la especificación a) de que f es lineal; mas una función lineal, $f(l)=al+b$, exige la fijación de las dos constantes a y b. Se ve por esta versión, no obstante, que los tres requisitos de CARNAP, a), b) y c), no son completamente generales: si la relación no fuese lineal se necesitarían más de dos constantes para precisar la función, y la elección del punto cero y de la unidad no serían suficientes. Afortunadamente, sin embargo, los físicos prefieren siempre la simplicidad de la escala lineal; utilizando el método así establecido, CARNAP estudia los conceptos más importantes de la física clásica (longitud, temperatura, tiempo, velocidad, aceleración, masa y carga eléctrica) de un modo a la vez estimulante, concreto y preciso.

La fase abstracta de la definición implica la construcción de un continuo tetradimensional (relativista). La verdad es que si este capítulo del librito de CARNAP hubiera sido escrito hoy habría sido mucho más extenso: habría ocupado en realidad la mayor parte de la obra; pues la física moderna se ha poblado de entidades abstractas hasta el punto que se puede decir que todo su método está necesitando una revisión, y que la moraleja extraída de ramas más antiguas necesita unas generalizaciones esenciales. De esta contingencia totalmente imprevisible es de lo que se resiente el meticuloso análisis de CARNAP: su lógica de la medición, que constituye su núcleo, permanece intacta, y trataremos de indicar ahora en qué importantes aspectos debería ser modificada; algunos de los extremos que enunciamos a continuación los justificaremos en los capítu-

los XVI a XVIII, pero la mayor parte de nuestra crítica se centrará sobre cuestiones ya estudiadas [4].

La técnica de medición y sus formas consecuentes de definición fracasarían si tratáramos de aplicarlas a la posición de un electrón o de cualquier partícula elemental de la física, o al estado (función φ) de cualquier átomo, molécula o fotón; fracaso que se debe principalmente a que el sistema, o portador de observables, tiene que ser *más* que todas las observaciones realizadas sobre él cuando no exista seguridad de que las observaciones sean estables (nos estamos refiriendo a la existencia de observables latentes). Para expresar más concretamente la cuestión: cuado vemos una piedra determinada la encontramos siempre gris, dura, de una determinada forma, pesada, etcétera, y no parece que haya nada que valga la pena de decir acerca de la piedra que no se halle resumido en estas propiedades; en el caso de las partículas atómicas la mayoría de las observaciones se dispersan, y solamente se logra la coherencia reuniéndolas en una referencia común a un *sistema* que funcionase, como si dijéramos, detrás de ellas. Queremos manifestar ahora claramente que no existe ninguna rigurosa compulsión lógica que nos fuerce a insertar tal referencia: el físico (al menos en tanto en cuanto profese no sentir interés alguno por la realidad) *puede* continuar su trabajo sin ella. Realizaría un gran sacrificio, sin embargo, pues, aparte de incurrir en la necesidad de un lenguaje altisonante, se vería forzado a aceptar un esquema muy complicado para dar sentido a la dispersa multitud de sus observaciones, y lo que realmente hace es elegir el procedimiento unificador más sencillo: *construye interpretativamente* átomos, electrones, etcétera, habla de ellos como sistemas y los utiliza como portadores de observables. En la física clásica la naturaleza posesiva de todas las propiedades sugería tan evidentemente un portador que su formulación específica era casi innecesaria; *en la moderna teoría de los cuantos el portador así sugerido amenaza disolverse y es preciso asentarlo por un acto metodológico consciente y deliberado.*

Naturalmente, la importancia de un claro reconocimiento de los sistemas es grande incluso en la física clásica, y ya lo hemos recalcado en los capítulos anteriores. En cuanto que los sistemas son diferentes de sus propiedades, no pueden ser definidos en la segunda fase de CARNAP, o cuantitativa, y hemos de concluir que o se les acepta sin más o deben el significado que posean a la primera etapa de definición, más rudimentaria. Pero encontramos aquí una dificultad: se nos ha dicho que al asentar una cosa a través de sus propiedades le asignamos (naturalmente, no existe *eso* a lo cual asignar algo, pero damos por sentada la presencia de una cosa) una propiedad permanente, como la de ser roja en todo momento, y entiendo que es aquí donde radica el núcleo mismo de la filosofía del empirista. Lo que se puede alcanzar por inducción es la validez *probable* de la proposición de que esta rosa me parecerá roja siem-

[4] Para el lector que quiera ver un sucinto examen crítico del positivismo lógico, recomendamos el artículo de Max BLACK: *Mod. Quarterly*, 1:51 (1938).

pre que la mire, pero no se llegará al enunciado de que hay una rosa, y es roja: esto último exige algo más que inducción, exige lo que hemos denominado *proceso de construcción interpretativa.*

Ahora bien, está perfectamente claro que el análisis de CARNAP no incurre en error: se refiere a la adecuada proposición inductiva y desea exhortar al científico para que haga otro tanto. Mas parece que la física ha caminado —y sigue caminando— en la otra dirección: si bien el modelo de sistemas, observables y estados es legítimo en la física clásica, es *indispensable* para comprender la teoría de los *cuantos,* y un esquema que no nos permita enfrentarnos directamente con cada una de estas entidades no es adecuado para la ciencia física [5].

Una diferencia más importante entre la posición de CARNAP y la que desarrollamos en este libro, quizá la diferencia que justifica las críticas expresadas más arriba, radica en que no estamos dispuestos —como tampoco la mayoría de los científicos— a comenzar la investigación filosófica al nivel del lenguaje: el físico concede mucha menos importancia

---

[5] Las últimas concepciones de CARNAP sobre este problema se alejan más aún del método de la ciencia. En su "Testability and Meaning" *(Phil. Sci.* 3:419 (1946)), desarrolla el siguiente esquema: sea Q_0 una afirmación física, por ejemplo, la de que existe una corriente eléctrica que circula por un conductor; sea Q_1 una frase que describa un circuito eléctrico, y exprese Q_2 la desviación de la aguja de un galvanómetro; forma entonces una oración reductora

$$Q_1 \supset (Q_2 \supset Q_0)$$

La negación de Q_0 viene dada por otra oración reductora,

$$Q_3 \supset (Q_4 \supset \sim Q_0)$$

Esta pareja de oraciones reductoras especifica una condición bajo la cual decimos que circula una corriente y otra condición bajo la cual lo negamos; por sí sola, sin embargo, no puede formar una definición. Pero supongamos que tenemos un gran número de parejas todas análogas a las anteriores:

$$Q_{4i+1} \supset (Q_{4i+2} \supset Q_0)$$

$$Q_{4i+3} \supset (Q_{4i+4} \supset \sim Q_0)$$

$$i = 0, 1, 2 \ldots$$

A base de ellas, CARNAP trata de definir Q_0 diciendo

$$Q_0 = Q_1 \cdot Q_2 V Q_5 \cdot Q_6 V \ldots V Q_{4i+1} \ldots Q_{4i+2} V \ldots \qquad (12.1)$$

Este procedimiento se halla en discordancia con la ciencia en dos importantes aspectos: a) a menos que $i \to \infty$ y hayamos explorado el universo entero, la definición de Q_0 no es completa; sin embargo, el físico se da cuenta de que es posible definir una cantidad aun antes de que se conozcan *todas* sus propiedades incidentales; b) según la fórmula (12.1), Q_0 es idéntico a cualquiera o a todas las disyunciones de la derecha; pero el físico considera a Q_0 capaz de *engendrar* condiciones que no estén contenidas en su definición.

Parece que esta teoría expía su explicitud lógica por una pérdida de contacto con la ciencia.

Quisiera añadir que no estoy seguro de que CARNAP sostenga actualmente la concepción que estamos sometiendo a crítica: en realidad, tengo razones para creer, sobre la base de manifestaciones verbales, que aceptaría ahora nuestras definiciones constitutivas. Hemos apuntado las observaciones precedentes porque la concepción de que se trata es clara e inequívoca, y son numerosos los lógicos y científicos que la sostienen en la actualidad.

a su lenguaje físico que la que le concede su generoso intérprete; *para él lo primario son la experiencia y las ideas;* cree (sin duda, con ciertos sentimientos de satisfacción) que se encuentra más en su medio entre experimentos e ideas que entre símbolos lingüísticos o de cualquier otra especie. Ciertamente, la experiencia psicológica de todo investigador es de pensamiento, de acción, de aventura: las comprensiones súbitas surgen sin ser bautizadas, las ideas nacen antes de que se las dé nombre, y a veces, los resultados de una teoría complicada se prevén en líneas generales antes, incluso, de que se pronuncie una sola palabra o se escriba sobre el papel un símbolo matemático. Con su insistencia en analizar el lenguaje físico, y apenas nada más, CARNAP honra a la actividad física, pero a la vez la restringe; nosotros sostenemos, con LEWIS [6], que "la expresión lingüística de lo que se quiere decir y de lo que es aprehendido es el fenómeno dependiente y derivado: son el significado y la aprehensión mismos los que constituyen los fenómenos fundamentales cognoscitivos, que son independientes de toda formulación lingüística".

Lo principal de la aportación de CARNAP al problema que estamos considerando radica en la claridad con que ha formulado el tipo de definición que conduce a la medición. Como veremos, existe otro tipo de ella, cuya importancia suele minimizar el empirista, pero que es preciso añadir para completar el cuadro.

Entre los físicos, BRIDGMAN aboga por una forma especial de empirismo: su enfoque no pasa a través de la lógica, sino que avanza a través de los campos formalizados, pero fértiles, de la actual investigación física y examina los elementos a los que se debe el progreso de la ciencia, observando que son las *definiciones operacionales.* Su punto de vista es parecido al de CARNAP en tanto en cuanto que hace del proceso de medición la parte central de todas las definiciones, con la sola diferencia de que la luz cae ahora no sobre la cosa, sino sobre el observador; pues, según CARNAP, la naturaleza era aquello cuyo modo de reaccionar a unas condiciones cambiantes determinaba las propiedades mensurables para el observador, mientras que, según BRIDGMAN, el observador las determina activamente mediante operaciones. Pero apenas importa esta diferencia. En su primera publicación [7], BRIDGMAN tenía a la vista principalmente la teoría de la relatividad y la primitiva teoría de los *cuantos,* notoriamente aptas las dos para dar una lección a las erradoras teorías que se apartan demasiado del campo de la observación. A partir de aquella época, la teoría cuántica se ha alejado de la observación, y la lección no está del todo clara.

Para quienes quieren comprender las concepciones de BRIDGMAN, es de interés saber con precisión qué es lo que se entiende por operación. Originariamente no parecía haber duda de que lo que tenían a la vista

---

[6] C. T. LEWIS: *An Analysis of Knowledge and Valuation,* La Salle de Ill., The Open Court Publishing Company, 1948.

[7] P. W. BRIDGMAN: *The Logic of Modern Physics,* Nueva York, The Macmillan Company, 1927.

eran operaciones *experimentales,* procesos que conducían a la medición; más tarde, sin embargo, BRIDGMAN ha hablado de operaciones "a base de lápiz y papel", e incluso de operaciones mentales, cosa que semeja una retirada, pues si se incluyera al pensamiento entre las operaciones nadie podría encontrar tacha al operacionalismo, ni éste diría gran cosa.

La aportación que consideramos importante es el hincapié que hace BRIDGMAN en los procedimientos instrumentales —que entenderemos idénticos a experimentales— como parte necesaria de ciertas definiciones. Tanto la idea como el término de definición operacional son excelentes, y las seguiremos empleando a medida que avance este libro; pero, como hemos dicho antes, exigen que se los complemente, y a esta tarea integradora final debemos aplicarnos ahora. Esperamos que a la luz de las observaciones más constructivas que siguen las críticas anteriores asuman un grado de coordinación más elevado del que hasta ahora se ha manifestado.

Las restantes secciones de este capítulo se consagran a demostrar la insuficiencia de toda teoría monolítica de las definiciones —sea la del físico que insiste en el enlace universal con las observaciones inmediatas o la del filósofo que niega todo significado que no surja de las mediciones— para todas las magnitudes de importancia en la ciencia física. Esperamos conseguirlo examinando primeramente unos pocos conceptos científicos de los más sencillos.

12.4. LAS DEFINICIONES CONSTITUTIVAS FRENTE A LAS EPISTÉMICAS

La velocidad de un cuerpo en movimiento es una de las magnitudes físicas más fáciles de definir: es igual a la distancia recorrida dividida por el tiempo invertido, o sea, en general, a dx/dt. Esto parece resolver la cuestión, y el profesor de física suele considerar que ha cumplido con su deber una vez que ha enseñado esta definición: como en ella se relaciona la velocidad con la distancia y el tiempo, aquélla se convierte en una magnitud "derivada" (CARNAP), en contraposición a la distancia y al tiempo, que son primarias porque pueden definirse directamente a base de operaciones. (Se supone, pues, que existen dos clases de magnitudes, ya que unas se definen directamente y otras en forma mediata.)

Pero, ¿qué hay de malo en la definición instrumental de velocidad que implica un velocímetro? Este instrumento, tan frecuente ahora, no mide la distancia recorrida y la divide por el tiempo, sino que utiliza un principio que dice (aproximadamente) que el influjo electromagnético de una pieza de metal en movimiento sobre un imán es proporcional a su velocidad. El conductor corriente ignora esto: para él, la indicación del velocímetro es la definición primaria cuantitativa de velocidad. ¿Por qué, entonces, ha de ser la velocidad una magnitud derivada? Nosotros creemos que no lo es y que la segunda definición es tan buena como la primera.

Tomemos otra magnitud llamada "derivada", la aceleración, que es igual a d^2x/dt^2, mezcla de las magnitudes primarias distancia y tiempo. Pero tenemos también acelerómetros, aparatos que miden directamente tal magnitud por medios instrumentales, sin recurrir a presuntas magnitudes primarias. Naturalmente, apoyándose en las leyes de la mecánica es posible demostrar que la magnitud así medida es igual a d^2x/dt^2, lo cual, sin embargo, no confiere primacía alguna a una u otra definición.

Lo que así hacemos visible con respecto a la velocidad y la aceleración vale para todas las magnitudes físicas consideradas generalmente como de carácter "derivado". Así, el *área* puede definirse de muchas maneras sin referencia a la medición (por ejemplo, mediante $\int dx\,dy$), pero la insuficiencia de todas estas definiciones que se ha hecho lastimosamente evidente en los últimos años para los fisiólogos, que necesitaban conocer el área del cuerpo humano en sus precisos estudios metabólicos: las definiciones derivadas no servían, y el hombre ha tenido que idear medios para medir áreas directamente; al hacerlo, ha dado un equivalente de una definición operacional [8]. (Algo análogo, aunque menos conocido, podría decirse del *volumen.*) La *densidad,* que generalmente se define como masa por unidad de volumen, puede también obtenerse directamente por un método que se vale del principio de ARQUÍMEDES, sin hacer intervenir volumen alguno. (La *potencia,* considerada como energía gastada por unidad de tiempo, tiene varias definiciones operacionales no equivalentes a ese sencillo enunciado. El vatímetro eléctrico, por ejemplo, no divide energía medida por tiempo medido.) Pueden aducirse innumerables ejemplos que hacen ver que este modo *dual* de definición, con una de ellas operacional y la otra hasta cierto punto independiente de toda medición, se emplea sin limitaciones para todas las magnitudes que ordinariamente se conciben como derivadas de otras.

Pero, ¿qué decir acerca del tiempo, la distancia y la masa, magnitudes físicas que habitualmente consideramos como primarias? Un breve examen pone de manifiesto que ellas también se hallan sujetas a definiciones duales. El *tiempo* se define operacionalmente haciendo referencia a relojes (cf. el cap. VII); por otra parte, hemos encontrado ya una definición no operacional, perfectamente válida, de la forma: el tiempo es la variable independiente en las ecuaciones de la mecánica. También en el capítulo VII se ha examinado cómo se define operacionalmente el *espacio* (distancia) mediante el empleo de varillas rígidas o señales luminosas. Una segunda —pero no secundaria— definición de distancia sería la integral con respecto al tiempo de las lecturas en el velocímetro.

Dejaremos para más adelante el estudio de la *masa.*

Aparece así evidente la relatividad y la multiplicidad de las definiciones, y no puede uno por menos de preguntarse la causa de que no

---

[8] Véase, p. ej., el estudio de los métodos actuales utilizados para medir áreas de E. BOYD: *The Growth of the Surface Area of the Human Body,* Minneapolis de Minn., University of Minnesota Press, 1935.

se la reconozca más generalmente. La contestación es probablemente doble. En primer lugar, las definiciones operacionales de magnitudes "derivadas", como velocidad, aceleración y área, se vieron retrasadas en su desarrollo porque no se han necesitado instrumentos para medirlas hasta hace bastante poco tiempo: no es que sean nuevos (Herón de Alejandría inventó una especie de velocímetro), pero a los científicos no les habían parecido dotados de la misma significación potencial que los relojes y las varas de medir. La falta de definiciones operacionales en el caso de algunas magnitudes ha hecho parecer menos universal este tipo de definición, aunque posiblemente sea el más importante, y ha conducido a la clasificación de tales magnitudes como "derivadas" de otras.

En segundo lugar, la distinción entre magnitudes físicas primarias y secundarias tiende a mantenerse viva por una confusión entre la *definición* de una cantidad y la atribución de una *dimensión*. Y conviene aquí hacer unas observaciones acerca de las dimensiones físicas.

En mecánica es posible formar la unidad de medida de cualquier magnitud a partir de las unidades de otras tres, y, en cierto modo, es posible formar así las definiciones de las magnitudes mismas. Las tres unidades más comúnmente elegidas como básicas son las unidades de longitud (el centímetro), tiempo (el segundo) y masa (el gramo). Por ejemplo, el lector recordará que la fuerza se mide en g cm seg^{-2} (dinas) y la potencia en g cm^2 seg^{-3} (ergios por segundo). Con cierta dosis de artificiosidad este modo de formación puede llevarse a la termodinámica y al electromagnetismo. Ahora bien, de las fórmulas que hacen patente la manera en que se forma con el tiempo, la longitud y la masa una magnitud física dada, tal como

$$\text{Fuerza} = [MLT^{-2}] \quad \text{o} \quad \text{potencia} = [ML^2T^{-3}]$$

por utilizar el simbolismo acostumbrado, se dice que representan la dimensión física respectiva. Este análisis ha conducido naturalmente al físico a considerar la masa, el tiempo y el espacio como entidades básicas desde el punto de vista de las dimensiones.

Ahora bien, es cierto que el análisis dimensional, que no se identifica lógicamente con la definición, puede realmente producir cierto tipo de ésta. Existen, sin embargo, otros muchos tipos que no están relacionados con el análisis dimensional excepto a través de las teorías de la naturaleza; y, sobre todo, tal análisis no es único: con tres magnitudes mecánicas *cualesquiera* se puede formar la base de un sistema de tres dimensiones; los ingenieros, por ejemplo, utilizan la fuerza, la longitud y el tiempo en lugar de las tres utilizadas anteriormente. Cabe advertir, pues, que el análisis dimensional no tiene nada que decir acerca de la lógica de las definiciones, aunque, probablemente, haya predispuesto a los científicos a la opinión de que ciertas definiciones son más básicas que otras.

Sin asignar prioridad, hemos observado una diferencia entre dos grandes clases de definiciones, dualidad que tenemos que especificar ahora

con mayor cuidado. Volvamos a uno de nuestros ejemplos, el tiempo. Una forma de definirlo es por referencia a un reloj; otra lo considera como la variable independiente en las leyes (y en las ecuaciones) del movimiento.

La primera es operacional, por usar el término de BRIDGMAN; podría también ser denominada instrumental para no dejar duda alguna de que involucra el uso de instrumentos físicos. En una publicación anterior [9] la he denominado *epistémica,* pues establece una regla de correspondencia entre la construcción interpretativa tiempo y la Naturaleza, rasgo éste que representa el verdadero carácter de todos los miembros de esta clase de definiciones, como hará palmaria una revisión de los ejemplos procedentes de esta sección: las definiciones operacionales o epistémicas son siempre reglas de correspondencia.

La segunda definición del tiempo no se dirige a la Naturaleza, sino que permanece en el campo C, enlazando varias construcciones interpretativas: dice *qué* es el tiempo de una manera en que no lo hace la definición epistémica, que sirve principalmente para asignar números; pero no proporciona ninguna medida de él que sea independiente de las demás. A falta de nombre mejor la llamaremos definición *constitutiva;* mirando a la figura 5.1 observamos ahora que cada línea doble es el equivalente de una definición epistémica, y cada línea sencilla el generador en potencia de una constitutiva [10].

12.5. BREVE REVISIÓN DE LAS DEFINICIONES EPISTÉMICAS Y CONSTITUTIVAS EN LA FÍSICA Y LAS MATEMÁTICAS

Una ciencia exacta es un complicado sistema de definiciones de ambos tipos, las razones de cuya equivalencia se conocen a través de la estructura teorética de la ciencia. En cierto sentido, las definiciones epistémicas y las constitutivas penetran toda la estructura de la teoría física y matemática: verdaderamente, se conocen los *hechos* de cualquier ciencia cuando se conocen todas sus definiciones epistémicas y todas las relaciones empíricas que las conecten. Todo esto, sin embargo, deja a la ciencia un campo de conocimientos carente del dinamismo de la autoevolución y de un mecanismo interno de autocorrección: tal cuerpo de conocimientos sólo puede crecer por aportación de material fáctico. Solamente cuando exista la posibilidad de una interacción entre elementos

---

[9] H. MARGENAU: *Phil. Sci.,* 2:48, 164 (1935).

[10] Esta cuestión es extremadamente importante en economía y en las ciencias sociales, aunque pasa generalmente inadvertida: hay magnitudes decisivas, como índices de precios, grado de inflación y renta nacional, que se definen con toda claridad operacionalmente, esto es, del lado epistémico. (Es frecuente *que haya* una multiplicidad de definiciones epistémicas.) Esta claridad con respecto al significado epistémico se toma muchas veces, erróneamente, por importancia teorética; pero obsérvese que, mientras falte una definición constitutiva de cada uno de estos términos, su uso científico será inseguro.

constitutivos y epistémicos, cuando, paradójicamente, el escenario de la ciencia presente la tautológica superabundancia de factores descriptivos que acompaña de forma inherente a la multiplicidad en las definiciones de cada cantidad física, poseerá la ciencia el deseado grado de fertilidad lógica. El positivismo en sus formas más extremas es unilateral al no querer admitir la importancia de las definiciones constitutivas: persigue un ideal *lógico* de simplicidad, el de evitar toda reduplicación de la descripción física; pero al hacerlo esteriliza a la ciencia.

Una cantidad física dada posee, en general, más de una definición epistémica y más de una constitutiva. De no ser por la coherencia proporcionada por este último tipo, sería un absurdo la existencia de varias definiciones epistémicas, pues no hay manera de que dos operaciones instrumentales diferentes puedan certificarse por sus propios merecimientos como especificadoras de la misma cosa: no es posible demostrar que los números obtenidos mediante operaciones realizadas con un metro tengan nada en común con aquello a que operacionalmente se alude con los experimentos efectuados con señales luminosas. Al llamar a ambas cosas *longitudes* estamos admitiendo tácitamente no tan sólo una especie limitada de equivalencia empírica entre las dos operaciones, sino una identidad lógica cuya evidencia proviene de las definiciones constitutivas.

Resolvamos, finalmente, otro dilema. Vemos que las definiciones epistémicas, tales como las del primitivo tipo de CARNAP y de BRIDGMAN no pueden funcionar confiriendo significado a *sistemas;* pero la escuela positivista ha extraído a menudo de esta circunstancia la completamente injustificada conclusión de que los sistemas no "existen" en el mismo sentido que las cantidades físicas[11]. Esto es lo que se ven obligados a mantener debido al carácter poco liberal de sus premisas. Las definiciones constitutivas, sin embargo, *permiten* el establecimiento de sistemas, pues la proposición de que un electrón, un átomo, un punto material o un campo es aquello que posea tales y cuales propiedades es una definición constitutiva; y es posible, de hecho, distinguir entre sistemas y cantidades en cualquier ciencia observando que los primeros son susceptibles solamente de una clase de definición (la constitutiva), mientras que las segundas pueden quedar definidas de las dos maneras.

La variedad de ejemplos de ambos tipos de definición presentados a lo largo del examen que venimos haciendo es quizá lo suficientemente grande para presentar una muestra adecuada de lo que ofrece la ciencia. Hacer una clasificación exhaustiva constituye una tarea enciclopédica que llenaría muchos volúmenes; pero hay unos cuantos ejemplos que son o instructivos o importantes, y que, por consiguiente, vamos a revisar.

El punto de vista que aquí bosquejamos es aplicable a todas las ciencias exactas, incluidas las matemáticas. Sucede que en la matemática pura las definiciones constitutivas desempeñan un papel más importante que en las ciencias naturales aplicadas, y ello debido a que las matemá-

[11] Recordamos al lector la polémica de MACH contra la realidad de los átomos.

ticas engendran *sistemas* —para los que no son utilizables las definiciones epistémicas— con mayor libertad que otras disciplinas; cabe mencionar como ejemplos los puntos, líneas, triángulos, números, matrices y grupos: a todos ellos se les asignan *propiedades* que son epistémicamente determinables y, a veces, mensurables.

Para refutar la pretensión de que las definiciones constitutivas son ociosas repeticiones de enunciados empíricos, recordemos las ideas de triángulo y de grupo. Todos los teoremas acerca de las propiedades de todo triángulo demostrados por EUCLIDES se hallaban contenidos en su definición constitutiva. Por otra parte, las definiciones epistémicas de longitud y ángulo por referencia a reglas graduadas, etcétera, hacen aplicables a la experiencia sensible las consecuencias constitutivas del triángulo euclidiano [12].

El grupo es una construcción aún más impresionante, que, aunque está definida sólo constitutivamente, es, sin embargo, de inmensa utilidad [13]. El interés por él procede en parte de las aplicaciones prácticas que permite, pero en forma más notable por la luz que proyecta sobre otras grandes clases de entidades matemáticas (parece cierto, en efecto, que la teoría de grupos disfrutaría de mayor favor entre los matemáticos si la naturaleza no contuviese un solo grupo empírico); tenemos así, pues, un sistema tan grávido de contenido constitutivo como para hacer casi insignificantes, comparativamente, sus aspectos epistémicos. Y otras muchas ideas de la matemática superior son de este género.

Como último ejemplo, consideremos el concepto físico de masa, cuyo significado escapa siempre al principiante debido a su frecuente confusión con el de peso.

La acostumbrada definición de masa dada por MACH [14] es un modelo de completitud, pero también una curiosa mezcla de elementos constitutivos y epistémicos. Como definición epistémica auténtica debería ser del tenor siguiente:

Elíjase un cuerpo A como cuerpo normal y consideremos arbitrariamente su masa como unidad. Hagamos interactuar de alguna manera el cuerpo B con el cuerpo A y midamos la aceleración simultánea de ambos;

---

[12] Es completamente cierto que no se harían estas correlaciones epistémicas salvo por lo que se refiere a su aplicabilidad.

[13] Para un significado preciso del grupo más allá de la indicación cuantitativa dada en la sección 7.7, debe consultar el lector la obra de W. BURNSIDE: *The Theory of Groups,* Londres, Cambridge University Press, 1927, o un libro sobre álgebra moderna, como el de G. BIRKHOFF y S. MCLANE: *Survey of Modern Algebra,* Nueva York, The Macmillan Company, 1941 [vers. cast.: *Algebra moderna,* Barcelona, Teide, 1954]. También se presenta una concisa exposición de la teoría de grupos en MARGENAU y MURPHY: *The Mathematics of Physics and Chemistry,* Nueva York, D. Van Nostrand Company, Inc., 1943 [vers. cast. cit.].

[14] Véase el clásico tratado *The Science of Mechanics,* de E. MACH (La Salle de Ill., Open Court Publishing Company, 1907, pág. 216 [vers. cast. cit., págs. 185-6]). Para una breve y modernizada versión, véase R. B. LINDSAY y H. MARGENAU: *Foundations of Physics,* Nueva York, John Wiley & Sons, Inc., 1936, págs. 92 y ss., suponemos aquí que se conocen los detalles pertinentes; pero puede omitirse el ejemplo sin que ello vaya en detrimento de la continuidad de nuestra exposición.

si se encuentra que son a_A y a_B, respectivamente, la masa de B es $-a_A/a_B$. (Todo lo demás que suele encontrarse en la definición de MACH es bagaje innecesario.)

Pero esta definición epistémica nos deja un poco insatisfechos, pues podría ser que la masa así formulada resultase ser función de, por ejemplo, el tiempo. Una contingencia igualmente desafortunada sería que la masa dependiese de la elección del cuerpo normal y de la clase de interacción: es fácilmente concebible que el procedimiento epistémico diera como resultado diferentes masas cuando los cuerpos A y B se hallasen conectados por un resorte, unidos por bandas de goma, o se repeliesen mutuamente por estar cargados eléctricamente; y si esto fuese cierto, la masa, como propiedad física de un cuerpo, no presentaría convergencia externa (cf. el capítulo VI), no sería un observable *poseído,* sino, en el mejor de los casos, un observable *latente* (cf. el capítulo VIII). Para predecir tales fallos, la presentación habitual de la ley de MACH introduce subrepticiamente disimuladas referencias a las leyes del movimiento segunda y tercera de NEWTON, de suerte que puedan asentarse los caracteres de independencia del tiempo e índole posesiva de la masa epistémicamente definida.

Para desenredar el nudo lógico necesitamos simplemente reconocer que, además de la definición epistémica anteriormente formulada, tenemos otra, basada en las leyes de NEWTON, y que expresa que la masa es el cociente de la fuerza dividida por la aceleración. La gloria de la mecánica es que ambas definiciones funcionen.

Naturalmente, si mantenemos las leyes de NEWTON las dos definiciones no son independientes; pero las leyes, sin embargo, no favorecen a ninguna de ellas. Reconocer solamente una clase de definición y utilizar luego las leyes para obtener la otra imprime a la ciencia un matiz filosófico que queremos evitar.

12.6. LA INTERACCIÓN ENTRE LAS DEFINICIONES Y LOS "A PRIORI"

La relación entre nuestro tratamiento de las definiciones y el análisis del método científico llevado a cabo en los capítulos IV a VI aparece con bastante claridad, y solamente requiere muy breve comentario. Como ya hemos indicado, una definición constitutiva representa una agrupación postulada de construcciones, permanece totalmente dentro del campo C y no es, por consiguiente, empíricamente verificable; en cambio, una definición epistémica es siempre una regla o un conjunto de reglas de correspondencia.

En la medida en que el límite entre el campo C y el plano P no está tajantemente delineado, y pueden muy bien surgir incertidumbres en cuanto a la localización en C o en P de ciertos elementos de la experiencia, pueden darse las correspondientes ambigüedades en cuanto a la naturaleza de las definiciones. Así, hemos tomado la definición del tiempo

por medio de un reloj por epistémica; el hecho es, sin embargo, que, en un sentido sumamente fundamental, el reloj mismo es una construcción interpretativa, por lo cual esta definición permanece, después de todo, en el campo C, y podríamos, por consiguiente, denominarla constitutiva. Pero la finalidad de la definición es, ciertamente, clara: pretende dirigirse hacia la Naturaleza en términos inequívocos, y aunque las supone, carece de reglas explícitas de correspondencia que vinculen el reloj mismo con la sensación inmediata. Para hacer la definición epistémica, tanto de forma como de contenido, necesitamos añadir esta referencia explícita, o sea, las cosificadoras correspondencias que enlazan las sensaciones inmediatas con el objeto externo reloj. Tal es frecuentemente lo que ocurre: no se presentan ambigüedades esenciales, esto es, ambigüedades que no puedan eliminarse de esta manera.

Mientras que una definición epistémica incompleta puede ser interpretada como constitutiva, es frecuente que las definiciones constitutivas incompletas parezcan ser epistémicas. Por ejemplo, hemos considerado la proposición de que velocidad$=x/t$ como una definición constitutiva (para una clase especial de movimientos); esto es exacto siempre que designemos con x y t las construcciones interpretativas que, realmente, suelen ser; y en esta inteligencia implícita hemos hablado; pero si alguien decide designar con tales expresiones un par de números obtenidos operacionalmente a los efectos que sean y añade esta estipulación a la definición, tendremos que considerarla como epistémica. (La ambigüedad que así encontramos puede de nuevo quedar eliminada mediante una explicación completa del significado de los términos.) Observemos una vez más que quien no logre distinguir entre x y t como construcciones interpretativas y x y t como datos de observación se verá obligado, en virtud de esta restricción, a considerar todas las definiciones como epistémicas: para él no pueden tener sentido nuestras observaciones.

La interacción entre los dos tipos de definiciones hace de la ciencia una empresa en marcha. Cuando se comprende un número suficiente de equivalencias entre proposiciones constitutivas y epistémicas concernientes a un conjunto de cantidades físicas, tenemos una teoría física, con lo que las equivalencias adquieren el carácter de leyes; e, inversamente, las leyes pueden adquirir el carácter de definiciones constitutivas. Este interesante desarrollo metodológico atraviesa toda la historia de la ciencia física.

V. F. LENZEN[15], que habla de un "método de definición sucesiva" y lo aplica al tema de la dinámica, ha reconocido y estudiado cuidadosamente su importancia. Este autor presenta del siguiente modo su núcleo sustancial: "Existen la abstracción de conceptos a partir de la experiencia, el descubrimiento de leyes expresadas a base de los conceptos, la definición de los conceptos originarios con un orden superior de apro-

---

[15] V. F. LENZEN: *The Nature of Physical Theorie*, Nueva York, John Wiley & Sons, Inc., 1931. Véanse particularmente las págs. 274 y sigs.

ximación a la vista del aumento de exactitud en la definición de condiciones, la redefinición de los conceptos basándose en las leyes y la reinterpretación de los conceptos originales a base de los nuevos".

Para ilustrar el proceso dentro de nuestro análisis, apliquémoslo a la magnitud física masa. Históricamente se la definió primero epistémicamente por medio de balanzas e instrumentos semejantes, de un modo que no permitía distinguirla del peso. Después se descubrió que satisfacía las leyes newtonianas del movimiento, siempre que se la definiese, con mayor precisión, como cociente entre la fuerza y la aceleración; de esta manera, el descubrimiento de leyes condujo a una redefinición constitutiva de la construcción interpretativa original, la cual, a su vez, dotó de mayor precisión a la definición epistémica (en la forma de MACH; véase la sección precedente). Se produjo entonces el descubrimiento de leyes más generales en la teoría de la relatividad, mediante las cuales podía definirse constitutivamente la masa como cierto parámetro de la métrica del espacio-tiempo, y partiendo de aquí se ha hecho posible una nueva definición epistémica, que enlaza este parámetro con las observaciones [16]. Sería una interesante tarea estudiar toda la historia de la física desde este punto de vista.

La evolución presentada en este capítulo tiene cierta repercusión en el significado del conocimiento "a priori". En el capítulo VII quedó apuntada la impropiedad de la distinción entre conceptos *a priori* y *a posteriori;* y la persistencia en la filosofía de esta distinción es sintomática de que continúa siendo incapaz de advertir la diferencia entre definiciones constitutivas y epistémicas. Pues quien proponga lo *a priori* será una persona que, habiendo aceptado una definición constitutiva y habiéndose adentrado en sus implicaciones analíticas, afirme luego su aplicabilidad automática a la Naturaleza, olvidando la intervención de reglas de correspondencia, esto es, de definiciones epistémicas que se eligieron con objeto de hacer que el concepto describiese experiencias reales.

Juntamente con el problema de lo apriorístico se desvanece así también la dificultad de comprender por qué la naturaleza obedece a leyes formales. Pues no es cierto que las leyes formales se apliquen directamente a la experiencia inmediata: existen más "parámetros" disponibles para el necesario ajuste, parámetros que se hallan dentro de nuestras definiciones epistémicas; y la libertad de que gozamos en su elección da a la ciencia la flexibilidad que necesita para abrazar la experiencia, y elimina todo carácter milagroso del hecho de la obediencia de la naturaleza a leyes.

---

[16] En la teoría general de la relatividad, los g_{ik} de la sección 7.6 son funciones de las masas; el conocimiento de los g_{ik} determina, por tanto, la masa y puede ser utilizado para su definición. Quede claro, no obstante, que se trata de un procedimiento un tanto artificial.

RESUMEN

En las tres primeras secciones del capítulo XII hemos considerado desde diversos ángulos el problema de cómo se han de definir las magnitudes científicas, y hemos dirigido críticas un tanto generales contra ciertas actitudes que son demasiado restrictivas en cuanto a conceder significado a los conceptos de la ciencia física. Hemos destacado para un examen más atento: 1) la pretensión sostenida a veces por profesores de ciencias de que toda magnitud científica no tiene más que una definición apropiada, y 2) las teorías de CARNAP y de BRIDGMAN, más alambicadas, que prescriben métodos únicos a seguir en el proceso de definición. Mantenemos que estas concepciones requieren una complementación tal que haga resaltar de modo evidente las relaciones no empíricas entre los conceptos científicos, sin destruir, no obstante ello, su fructífero enlace con las observaciones.

Hemos consagrado las tres últimas secciones a la tarea, más constructiva, de mostrar cómo puede realizarse tal cosa. Distinguimos al efecto dos clases o tipos generales de definiciones: las que relacionan las construcciones interpretativas con la experiencia inmediata y las que relacionan tales construcciones entre sí dentro del campo *C*. Las primeras se denominan definiciones *epistémicas,* u operacionales; surgen de nuestras primitivas correlaciones epistémicas o reglas de correspondencia y son equivalentes a ellas (la definición del tiempo por referencia a los relojes es de este tipo). La segunda clase se llama la clase de las definiciones *constitutivas,* de la cual es ejemplo la definición del tiempo como la variable independiente en las leyes del movimiento. Una cantidad física dada puede tener cierto número de definiciones epistémicas y cierto número de definiciones constitutivas.

La interacción entre los dos tipos hace de la ciencia una empresa que avanza autocorrigiéndose: sin definiciones epistémicas la ciencia degenera en especulación; y en ausencia de definiciones constitutivas se convierte en un estéril registro de hechos de observación, y sus fórmulas adquieren el carácter de fórmulas médicas. Las leyes físicas pueden considerarse como mediadores entre los dos tipos de definición de cantidades específicas. En el desarrollo de una ciencia, el descubrimiento de una ley conduce frecuentemente a nuevas definiciones constitutivas, e, inversamente, una nueva definición de este tipo puede engendrar una ley.

El problema de lo *a priori* queda situado bajo una nueva luz en virtud de la distinción que hemos puesto así de relieve: quien propone la validez de los juicios *a priori* es una persona que, habiendo aceptado una definición constitutiva dada y habiéndose adentrado en sus implicaciones analíticas, afirma su aplicabilidad automática a la naturaleza, olvidando la intervención de definiciones epistémicas, que se adoptaron con objeto de que el concepto describiese la experiencia real.

BIBLIOGRAFIA

BLACK, M.: *Critical Thinking: An Introduction to Logic and Scientific Method,* Prentice-Hall, Inc., Nueva York, 1946.

BRIDGMAN, P. W.: *Dimensional Analysis,* Yale University Press, New Haven, Conn., 1922.

BRIDGMAN, P. W.: *The Logic of Modern Physics,* The Macmillan Company, Nueva York, 1927.

CARNAP, R.: *Physikalische Begriffsbildung,* G. Braun, Karlsruhe, 1926.

CARNAP, R.: "Testability and Meaning", *Phil. Sci.,* 3:419 (1946).

COHEN, M. R.: *A Preface to Logic,* Henry Holt and Company, Inc., Nueva York, 1944.

MILL, J. S.: *A System of Logic,* Nueva York, Harper & Brothers, 1900 [la edición orig. es de 1843; vers. cast.: *Sistema de lógica demostrativa e inductiva...* (2 tomos), Madrid, Rivadeneyra, 1853]. exposición clásica de una postura antitética a la adoptada en este libro.

OGDEN, C. K., e I. A. RICHARDS: *The Meaning of Meaning,* Nueva York, Harcourt, Brace & Company, Inc., 1925 [vers. cast.: *El significado del significado,* Buenos Aires, 1954].

POINCARÉ, H.: *Science and Hypotesis,* Londres, Walter Scott [edición original: *La Science et l'hypothèse.* París, Flammarion, 1920; vers. cast.: *La ciencia y la hipótesis,* Buenos Aires, Espasa Calpe, 1943 y eds. poster.].

QUINE, W. V.: *Elementary Logic,* Ginn & Company, Boston, 1941.

STEBBING, L. S.: *A Modern Elementary Logic,* Methuen & Co., Ltd., Londres, 1943 [vers. cast.: *Introducción a la lógica moderna,* México, F. C. E., 1965].

SWABEY, M. C.: *Logic and Nature,* New York University Press, Nueva York, 1930.

TARSKI, A.: *Introduction to Logic and to the Methodology of the Deductive Sciences,* Nueva York, Oxford University Press, 1941 [vers cast.: *Introducción a la lógica y a la metodología de las ciencias deductivas,* Buenos Aires, Espasa Calpe, 1951].

WELD, L. R. D.: *Glossary of Physics,* Nueva York, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1937.

WOODGER, J. H.: "The Technique of Theory Construction", *International Encyclopedia of Unified Science,* vol. 2, núm. 5, University of Chicago Press, Chicago, 1939.

CAPITULO XIII

LA PROBABILIDAD

13.1. Probabilidad y lógica inductiva

No es posible exponer, ni siquiera resumir, en un solo capítulo un tema tan extenso y ramificado como el de la probabilidad: y por ello es muy conveniente que elijamos para estudio aquellas fases o aspectos suyos que tienen una repercusión más directa sobre la epistemología. Teniendo en cuenta la necesidad de esta discriminación hay dos cosas que no pueden intentarse: debemos renunciar, en primer término, a toda pretensión de dar una relación imparcial de las numerosas actitudes filosóficas adoptadas por los pensadores respecto al significado de la probabilidad; el lector que lo desee puede consultar el competente estudio crítico de Ernest Nagel[1]; y en segundo lugar, nos vemos obligados a pasar por alto los detalles técnicos, excepto en tanto en cuanto sean necesarios para comprender los fundamentos y llegar a una terminología estable. Son numerosos los libros que proporcionan este conocimiento; damos una pequeña lista de ellos en nota a pie de página, lista suficiente para nuestros fines y razonablemente representativa de las distintas opiniones[2].

Existe otra razón para las restricciones que nos vamos a imponer, razón que hace de la necesidad de nuestra limitación casi una afortunada circunstancia. Los estudios generales del significado de la probabilidad llevados a cabo por los filósofos han dado últimamente pocas pruebas de acuerdo sobre ninguna opinión en boga, y la literatura se va haciendo progresivamente más confusa; como ejemplo, podemos citar un reciente simposio[3] destinado a aclarar los problemas suscitados en este campo, pero que acabó poco más que con una demostración de esta

---

[1] E. Nagel: "Principles of the Theory of the Probability", *International Encyclopedia of Unified Science*, vol. I, núm. 6, Chicago, University of Chicago Press, 1939.

[2] P. S. Laplace: *Essai philosophique des probabilités*, París, 1814. R. von Mises: *Wahrscheinlichkeitsrechnung und ihre Anwendung*, Leipzig, 1931, J. V. Uspensky: *Introduction to Mathematical Probability*, Nueva York, McGraw-Hill Book Company, Inc, 1937 [vers. cast.: *Matemáticas de las probabilidades*, Buenos Aires, Nigar, 1947]. T. C. Fry: *Probability and Its Engineering Uses*, Nueva York, D. Van Nostrand Company, Inc., 1928.

[3] *Philosophy and Phenomenological Research*, vol. 5, págs. 449-484. Vol. 6, 1945, págs. 11-86. Participantes: G. Bergmann, Carnap, F. Kaufmann, Margenau, Von Mises, Nagel, Reichenbach y D. Williams.

confusión: el volumen de retórica que envolvió incluso a las cuestiones menos importantes y la banderiza tenacidad con que se las defendió en aquella ocasión suscitan justificables dudas en cuanto a lo deseable que pueda ser el pasar revista a todas las actitudes. En contraste con estas actuaciones, sin embargo, observamos la creciente claridad que rodea a la idea de probabilidad por el lado matemático, y la cada vez más profunda comprensión de ella que se ha venido logrando durante las últimas décadas mediante una aplicación de la teoría de conjuntos.

Cabe que, centrando la atención en la parte cardinal del problema, esto es, sobre su epistemología, pueda resolverse la confusión. Tal es mi convicción, y surge de la siguiente y sencilla observación: lo que en la filosofía de la probabilidad aparece como una maraña de ideas en conflicto adopta un orden perfecto cuando se lo contempla a la luz del modo dual de definición expuesto en el precedente capítulo; la imagen que presenta es como un anaglifo, deplorablemente confuso cuando se lo mira a simple vista, pero lleno de relieve y de orden cuando se contempla a través de las gafas bicolores de esa teoría. Este es uno de los extremos que queremos destacar en las secciones siguientes. Nuestro segundo propósito es proporcionar un equipo fáctico suficiente para que podamos luego continuar con el estudio de dos ciencias modernas cargadas de consecuencias metodológicas y provistas de señales indicadoras que apuntan a la realidad y que no podemos pasar por alto: estas ciencias son la mecánica estadística y la mecánica cuántica.

Como en todos los demás lugares de este libro, centraremos la atención en la ciencia teorética y, a partir de ahí, la haremos que termine por abrazar toda la ciencia; por ello, vamos a estudiar la noción de probabilidad tal como funciona y tal como se la concibe hoy dentro de la ciencia. Esto implica también una drástica limitación, pues puede haber excelentes formulaciones de la probabilidad distintas de las usadas en la ciencia; pero vamos a mantener la actitud previamente adoptada cuando, por ejemplo, al estudiar el espacio tetradimensional no prestábamos atención a una creencia popular que ve en la cuarta dimensión la morada de las almas desprendidas ya del cuerpo, ni teníamos en cuenta los "terrenos cultivados" cuando nos ocupábamos de la física de los campos. El científico insiste en que las cosas se entienden de un modo muy determinado y hace un uso muy definido de dimensiones y campos, así como de probabilidades; y lo que aquí nos interesa es solamente tales modos de entender y uso. Cuando el físico dice que la probabilidad de desintegración de un núcleo de uranio es 4,3 por 10^{-18} por segundo, quiere decir algo muy específico, y aceptamos y respetamos ese significado; y cuando se encoge de hombros como contestación a la pregunta sobre cuál es la probabilidad de que la *teoría de la relatividad* sea cierta, también respetamos esa respuesta.

Parte de la confusión existente se debe al fervor misionero con que todo el mundo trata de decir al científico lo que *debería* querer decir con "probabilidad": es como si el político dijese al físico lo que debe

entender por "potencia", o el general lo que debe entender por "fuerzas". Como ocurre con cualquier otra palabra, la probabilidad, tal como se usa en la conversación (y con entera propiedad), tiene una gran variedad de significados, entre los que tiene derecho a elegir el científico.

Nosotros creemos que éste, por su parte, ya ha elegido, y que no identifica la teoría de la probabilidad con la *lógica inductiva,* como tan apremiantemente insisten CARNAP, REICHENBACH, HEMPEL y otros autores: pues lo que estas últimas personas hacen en realidad (y lo hacen con notorio buen éxito) es proponer una nueva ciencia formal, la teoría de la inferencia; no están hacienedo observaciones sobre qué es lo que en la actualidad se concibe como probabilidad en la física y en las ciencias exactas derivadas de ella; y como prueba de lo apropiado de este juicio podría señalarse el fracaso de los esfuerzos de los lógicos inductivos por establecer contacto con los decisivos y candentes problemas de la ciencia física. Para que nuestro juicio no parezca excesivamente acre, recordamos al lector que este libro está enteramente consagrado a la ciencia exacta, no a la correlacional (diferencia que pusimos cuidadosamente de relieve en el capítulo II); no pretendemos, sin embargo, realizar aquí ninguna crítica de los métodos de inferencia experimental, que, no obstante, consideramos como penúltimos e insuficientes para una definición completa de la realidad física.

La inferencia inductiva es, por su parte, una ciencia que implica construcciones y requisitos metafísicos, y muchos de los juicios que formula se hallan lejos de ser inductivos; circunstancia que debería gozar de bastante claridad, incluso procedente de la muy inadecuada exposición que hemos hecho en el capítulo VI de los problemas de convergencia externa e interna y de la teoría de errores. En física, química y grandes partes de la biología, las teorías de la inferencia inductiva se emplean para el ajuste de los datos, pero, como sucede con cualquier otro formalismo teorético, se emplean repletas de construcciones interpretativas y correlacionales. Podemos decir, sin miedo a equivocarnos, por ejemplo, que si algún día resultasen inapropiados los métodos usuales de ajuste se idearían nuevos axiomas y nuevas reglas de correspondencia con la observación inmediata. Toda la cuestión de la inferencia empírica no está ni más ni menos firmemente asentada en la Naturaleza que cualquier otra teoría de la ciencia.

El valor incidental de los métodos correlacionales es, naturalmente, muy grande, incluso en las ciencias exactas. Pues, como hemos mostrado en el capítulo VI, siempre son necesarios para hacer únicos e inequívocos los veredictos de la Naturaleza y para pulir las toscas inmediateces antes de que se les permita entrar en el salón de las construcciones interpretativas. Y existen en física numerosos casos en los que tales métodos dicen la última palabra, en los que lo revelado por la Naturaleza ni siquiera ve jamás la pulcra vivienda de las construcciones interpretativas. Tenemos ejemplos de este tipo en la medición de las constantes de la Naturaleza: para obtener el valor más aceptable de la

velocidad de la luz, por ejemplo, se han utilizado procedimientos correlacionales muy complicados [4], y ahí termina la historia, pues la teoría es actualmente incapaz de predecir el valor de *c* basándose en consideraciones independientes. Pero (cosa que es característica) los físicos no pueden por menos de irritarse al comprender que así ha de ser: creen que algún día tendrán una teoría que relacione el valor de esta famosa constante con otras, pero suelen considerar infortunada la circunstancia de que los métodos correlacionales que conducen al valor más aceptable de *c*, pero basado en hechos brutos, sin contexto, podrían ser el último recurso [5].

Muchos científicos consideran, pues, la teoría de la inferencia inductiva, con toda su importancia práctica, como un sustitutivo de la verdadera ciencia; pues tal inferencia enseña qué es lo mejor que se puede hacer en presencia de elementos de juicio *incompletos*, donde fracasa la ciencia exacta. Desde luego, como persona de amplios horizontes, al hombre de ciencia que se ocupa de la física le interesa esta teoría; pero también reconoce que las situaciones—por numerosas que sean—en las que la inferencia inductiva es actualmente necesaria son como retos lanzados a la aplicación del método científico; así, pues, trata de evitar la inducción, y se inclina a considerar los campos que solamente se prestan al análisis inductivo como territorio no conquistado, más que como pertenecientes a sus propios y auténticos dominios. Esta sensación no es universal, naturalmente, pero sí dominante, y parece ir desarrollándose progresivamente entre los cultivadores de la ciencia natural.

Las ciencias exactas son, después de todo, deductivas en sus fases más importantes, y las ciencias correlacionales, al esforzarse por convertirse en exactas, respaldan implícitamente la metodología de estas últimas. Como ya hemos puesto repetidamente de relieve e ilustrado con abundantes ejemplos, el movimiento lógico de toda ciencia suficientemente desarrollada se dirige desde lo general a lo particular, desde los postulados hasta las teorías, los teoremas y las predicciones científicas. La historia y la psicología del descubrimiento invierten frecuentemente este curso, cierto; pero alegar que ello destruye el carácter deductivo de la ciencia es confundir la secuencia temporal (o psicológica) con la estructura lógica y epistemológica.

Todo descubrimiento científico individual se refiere, más allá de la circunstancia fáctica en que surja, a algo de *significación* universal. La diferencia entre observar un hecho y hacer un descubrimiento se centra precisamente en esta condición crucial: que un descubrimiento sugiere una proposición postulatoria marcadamente general que apremia a una

---

[4] Véase R. T. BIRGE: *Rev. Mod. Phys.*, 13:1933 (1941), así como J. W. M. DU MOND y E. R. COHEN: *Rev. Mod. Phys.*, 20:82 (1948).

[5] El lector que quiera ver una exposición filosófica de métodos correlacionales que haga hincapié de modo que contrarreste la selectiva presentación de materiales practicada en este libro puede consultar la obra de W. CHURCHMAN: *Theory of Experimental Inference*, Nueva York, The Macmillan Company, 1948.

aceptación provisional, mientras que el hecho permite una mera generalización inductiva; cuando se lo analiza, el postulado está repleto de consecuencias deductivas, cada una de las cuales expresa más que el descubrimiento originario, mientras que la generalización inductiva como tal no puede expresar nada, excepto lo que podría suceder al pasar revista a hechos análogos.

La "sugerencia" de significación que ofrecen los hechos descubiertos no es inductiva, es constructiva al modo considerado anteriormente, y la significación postulada se verifica mediante los procedimientos esbozados en el capítulo VII. Es conveniente, sin embargo, mencionar aquí otra interesante distinción entre el método de la ciencia y el de la inferencia inductiva: ésta posee un valor de verdad proporcionado a nuestra confianza en los datos que condujeran a ella, de modo que su validez procede totalmente de las circunstancias en que se origine la inducción; una construcción científica, sin embargo, es verdadera en cierto e importante sentido con independencia de su génesis fáctica: su pretensión de universalidad es completamente insostenible sobre bases inductivas, ya que puede quedar *desautorizada* o *disfirmada* por un sólo hecho que se oponga a ella (cosa que no sucede a ninguna auténtica generalización inductiva), en tanto que su confirmación, por otra parte, se suele conceder sobre la base de un limitado número de casos confirmadores. También esto es inaplicable a la práctica inductiva. Lo que aquí ocurre es, evidentemente, lo que sigue: como el método deductivo está dispuesto a admitir con la máxima presteza la falsedad de una teoría, aceptamos su verdad (lo cual significa su completa verdad) sobre la base de unos elementos de juicio muy limitados; y nunca discutimos acerca de si posee un valor veritativo del 50 o el 90 por 100, sino que, cuando surge la necesidad de tomar esa decisión, rechazamos la teoría en favor de otra.

13.2. La probabilidad es una cantidad física mensurable

A modo de resumen, volvamos a la línea principal de nuestro estudio La ciencia es una disciplina deductiva, y con la lógica de la inferencia inductiva se la caracteriza muy inadecuadamente. Cuando utiliza probabilidades (como hace frecuentemente), la ciencia no las considera como grados de confirmación de proposiciones empíricas, sino como magnitudes físicas mensurables (y calculables), al igual que las longitudes, las energías y las longitudes de onda.

La probabilidad de error se determina *midiendo* la amplitud de cierta curva de distribución; la probabilidad de que una molécula tenga una velocidad dada se halla *midiendo* la densidad de las moléculas en un disco rotatorio (cf. la pág. 236); la probabilidad de las distintas energías de un átomo a cierta temperatura se obtiene *midiendo* la distribución de las intensidades espectrales que emita; y la esperanza de vida se encuentra contando cuidadosamente los casos. Ninguno de estos ejem-

plos contiene ni la más leve insinuación de un "grado de confirmación de una proposición"; sin embargo, vamos a entender las probabilidades en el sentido de tales ejemplos.

Tal vez sea conveniente pasar una breve revista de la clase de cuestiones a las que, debido a las restricciones que nos hemos impuesto, no podremos responder. La probabilidad de un acontecimiento verdaderamente único es intrínsecamente de imposible medición, y, por lo tanto, se nos escapará; así, la ciencia no tiene nada que decir acerca de la *probabilidad* de un acto de creación cósmica, aunque pueda afirmar o negar que haya ocurrido; tampoco podremos atribuir una probabilidad a una teoría o una hipótesis, ya que éstas se clasifican de un modo más idóneo en válidas, aproximadas o falsas[6]; finalmente, debemos profesar indiferencia respecto a muchos de los usos comunes de la palabra *probable;* así, cuando una persona a la que pedimos que nos haga un favor contesta "probablemente lo haré", nos vemos obligados a traducir sus palabras de la siguiente manera: lo haré si se dan ciertas condiciones; y es fácil imaginar otros muchos ejemplos en los que la probabilidad designe un grado subjetivo de creencia o una vaga especie de posibilidad. Dejaremos de tomar en consideración todos esos casos.

El idioma inglés sanciona en parte esta distinción: deriva la palabra *probable* de la misma raíz que *provable* (demostrable, en castellano), mientras que *likely* (verosímil, probable) tiene originariamente que ver con *seeming* (aparente). Tal vez resulte interesante apuntar el hecho de que el idioma francés hace también honor a esta distinción *(probable* frente a *vraisemblable),* mientras que no ocurre lo mismo en alemán *(wahrscheinlich* es un término carente de toda eficacia discriminadora). A falta de pruebas, podría uno sentir la tentación de considerar la posibilidad de que los autores alemanes, con su propensión lingüística a pasar por alto esta distinción, hayan contribuido a eliminarla de otros idiomas[7].

Está muy bien llamar probabilidad a una cantidad mensurable y justificar este atributo con unos cuantos ejemplos técnicos, como hemos hecho más arriba. Pero, en concreto, ¿cómo se mide la probabilidad? Y, si se la puede medir, ¿se hallará libre su medición de dificultades internas? En las próximas secciones nos ocuparemos de la primera de esas dos cuestiones, que no presenta problema alguno, pues la ciencia la ha resuelto ya, y sólo necesitamos parar mientes en los procedimientos por los que se determinan actualmente las probabilidades. Pero la segunda cuestión parece un tanto embarazosa a primera vista y puede, por ello, crear dudas suficientes como para distraer nuestra atención de la primera; pues, como sabemos por el capítulo VI, la medición misma de

---

[6] La validez, pese a sus resonancias de todo o nada es, sin embargo, un atributo temporal.

[7] Tal vez sea difícil defender esta conjetura, habida cuenta de que los recientes propugnadores de una interpretación general de la probabilidad apoyada en la "verosimilitud" son principalmente británicos (KEYNES y JEFFREYS).

cualquier cantidad física implica consideraciones probabilitarias, de modo que parece que nos estamos aproximando a un círculo vicioso cuando nos esforzamos por convertir la propia probabilidad en algo mensurable. Estas dudas pueden, sin embargo, eliminarse inmediatamente.

Para obtener el valor de una cantidad física es preciso medirla cierto número de veces. Cada medición tiene un error, y para averiguar el "verdadero" valor se computa (generalmente) la media aritmética de todos los valores medidos; esto es todo lo que necesitamos para seguir la pista al proceso de medición. Es oportuno observar que no han intervenido todavía las probabilidades, que sólo se necesitarán más tarde, cuando se haya de justificar racionalmente la distribución de errores.

Para determinar probabilidades mediante mediciones procedemos de forma similar, midiendo la frecuencia relativa (véase más adelante) de un suceso en una serie de pruebas: cada frecuencia relativa tiene un error, y la "verdadera" probabilidad se computa hallando la media de las frecuencias relativas en un número de series. En este estadio de la medición no importa la distribución de frecuencias en torno a la media, ni existe tampoco necesidad de apelar a probabilidades de orden superior, probabilidades de probabilidades, etc., para racionalizar tales empeños: uno se limita a esperar que habrá concordancia con alguna teoría constructiva destinada a predecir las frecuencias medidas.

El hecho de que las probabilidades medidas (frecuencias relativas) tengan errores es sintomático de su parentesco con cantidades físicas del tipo más ortodoxo; y, en realidad, la forma en que indicamos el error delata la interpretación del científico: una buena práctica exige que la probabilidad de un acontecimiento se escriba de la forma $0{,}735 \pm \pm 0{,}002$, por ejemplo; así, pues, se emplea la misma forma que para la velocidad de la luz (299.776 ± 4 km/sg). Una vez admitido esto, no resta nada extraño ni incoherente en la idea de que la probabilidad sea una cantidad física mensurable.

13.3. Dos modos de definir la probabilidad

El camino se abre ahora despejado ante nosotros: puesto que toda cantidad física, si ha de ser efectiva en el terreno de la ciencia, debe ser definible de dos formas cuanto menos, una constitutiva y otra epistémica, justo es que la probabilidad esté sometida a tal regla. Existen, de hecho, dos definiciones clásicas, que realizan de forma exacta las dos tareas requeridas: una se debe a Laplace, y recibe frecuentemente el nombre de forma *a priori* de la probabilidad; la otra recibió el primer impulso de Ellis, Cournot y otros autores, y se la conoce bajo los nombres de teoría *a posteriori* y, más adecuadamente, de teoría frecuencial de la probabilidad. Pero, en vez de agradecer a la Providencia que haya provisto a la probabilidad de los dos certificados que necesita para ingresar en la ciencia, el lógico moderno discute a veces sobre cuál de

los dos es "correcto": al no ver su vinculación a través de la ciencia, cree erróneamente que las dos definiciones se contradicen entre sí

La definición de LAPLACE, que veremos con más detalle en la sección siguiente, considera que la probabilidad de un acontecimiento es el número de casos favorables dividido por el número total de casos "equiposibles". Por utilizar un ejemplo clásico, la probabilidad de obtener dos ases con dos dados es 1/36, porque existe un solo caso favorable al acontecimiento (1+1), y existen $6\times6=36$ posibilidades de combinar los números de los dos dados; la probabilidad de obtener un total de 5 puntos en las mismas circunstancias es 1/9, según la regla de LAPLACE, puesto que hay cuatro maneras de formar una puntuación de 5 (1+4, 2+3, 3+2, 4+1) y 36 posibilidades en total; y análogamente puede demostrarse que la probabilidad de encontrarse con los cuatro ases en la mano al comienzo de una partida de bridge es 1/64. El método de determinar todos estos valores es "a priori" en cuanto que permite averiguarlos antes de la medición (si bien, naturalmente, no antes de todo conocimiento empírico acerca de los dados y las cartas).

La definición frecuencial no presta atención a posibilidades iguales: asume que la probabilidad es el cociente entre el número de veces que se presente el acontecimiento en una serie de pruebas y el número total de acontecimientos. Así, la probabilidad de lograr una puntuación de 2 con dos dados es 1/36, o muy próxima a esta cifra, porque en una larga serie de tiradas con dos dados, en trescientas sesenta y tres tiradas, por ejemplo, ha salido 2 diez veces: el número 1/36 se obtiene realizando una sucesión de observaciones; de ahí el término de *a posteriori*.

Ahora bien: la regla de LAPLACE posee todas las características de una definición constitutiva: tácitamente, se compromete con cierta teoría, que funciona sorprendentemente bien en los juegos de azar, y al aceptarla aceptamos esa teoría. Como otras muchas definiciones constitutivas, tiene un margen de aplicación limitado y resulta inservible en numerosos casos. (Las compañías de seguros de vida no computan las tablas de mortalidad confrontando las diversas maneras de morir con las formas de sobrevivir.) Finalmente, como todas las demás definiciones constitutivas de cantidades físicas, la fórmula de LAPLACE es *exacta* y no contiene cláusula alguna para la atribución de errores: es en todo análoga a la definición de velocidad como cociente entre la distancia recorrida y el tiempo invertido.

Por otra parte, la formulación frecuencial es, evidentemente, una regla de correspondencia y, por consiguiente, una definición epistémica de la probabilidad. La gran extensión de sus aplicaciones proviene de la circunstancia de que hallamos en nuestra experiencia numerosas situaciones, llamadas secuencias "estadísticas" de acontecimientos, que parecen caracterizarse solamente por el hecho de que la frecuencia relativa de aparición de determinado tipo de sucesos, como el que salga una puntuación de 2 en una tirada de dados, resulta ser casi constante. ¿Por

qué, pues, no proceder como en todos los casos análogos de presentación invariable? ¿Por qué no dar un nombre a esa magnitud constante y reglamentar mediante normas operacionales cómo debemos medirla? Esto es lo que consigue la definición frecuencial.

Toda formulación es estéril en sí misma. Para sacar algo interesante de la estancada situación lógica tenemos que activar la probabilidad en cuanto magnitud física, lo cual significa que hemos de emparejar las dos definiciones y observar cómo repercuten una sobre otra. A modo de ensayo, aceptando la regla de LAPLACE y considerando igual a 1/36 la predicción teórica acerca de la probabilidad de obtener 2, utilizamos la regla de correspondencia proporcionada por el frecuentista y sometemos a *verificación* la teoría de LAPLACE: si la frecuencia relativa resulta ser 1/36, hemos demostrado la equivalencia de las dos definiciones y también que la teoría formulada por su conyunción es exacta. La equivalencia es cuestión que se ha de solventar empíricamente; de ahí que todos los intentos por reducir una a la otra mediante procedimientos lógicos o de otro tipo estén condenados al fracaso.

Aunque las formulaciones laplaciana y frecuencial de la probabilidad han estado muy en candelero, no son las únicas representantes de nuestros dos modos de definición: las definiciones constitutivas son, en realidad, tan numerosas como las teorías en las que entra la probabilidad. En el capítulo siguiente se estudiarán con más detenimiento varias de ellas, en particular una debida a GIBBS; la teoría de los *cuantos* incluye un ejemplo muy interesante, que relaciona las probabilidades con las funciones de estado de los sistemas físicos. Todas éstas son representaciones satisfactorias del modo constitutivo, tan satisfactorias, ciertamente, como la fórmula de LAPLACE; y el hecho de que, generalmente, se las pase por alto o se las considere subordinadas solamente puede ser debido a que los filósofos han centrado con más intensidad su atención en los juegos de azar que en la física moderna.

Podemos elegir un sencillo y muy conocido ejemplo constitutivo para hacer algunas observaciones. Según MAXWELL, la probabilidad de que una molécula de un gas tenga una velocidad v es igual a

$$\text{C.}^{\text{te}} \times e^{-v^2/kT} v^2.$$

La cantidad T que aquí aparece es la temperatura del gas, y k la constante de BOLTZMANN. Esta no es, tal vez, tan sencilla como la prescripción de LAPLACE, ni tampoco es aplicable a los mismos campos; pero allí donde la *es*, logra lo mismo que ella, es decir, relacionar la probabilidad con otras magnitudes físicas. En el caso de LAPLACE estas otras magnitudes podrían ser el número de caras y la simetría de un dado; aquí son la temperatura y la constante de BOLTZMANN.

Las definiciones epistémicas no son tan numerosas, y la definición frecuencial posee un rango casi único. Pero no reina en solitario esplendor: en primer lugar, el estudioso atento del tema puede discernir suficientes variaciones en el significado de las frecuencias relativas como

para que equivalgan, en realidad, a toda una variedad de definiciones; y existe además la sutil distinción entre frecuencias relativas y sus límites a medida que aumente el número de observaciones. Pero estas cuestiones se abordarán más adelante; por el momento será útil mostrar una regla epistémica de tipo completamente diferente, que frecuentemente vale a modo de definición frecuencial.

Para verificar la ley de MAXWELL de la distribución de velocidades, anteriormente mencionada, el físico no determina la velocidad de una molécula en una serie de pruebas, cosa que constituiría una tarea excesivamente laboriosa; en lugar de ello, envía una corriente de moléculas a través de una ventana en forma de sector abierta en un disco rotatorio y determina el número de ellas que pasan a través de un sector parecido desplazado en otro disco rotatorio, a cierta distancia del primero, pero que gire sobre el mismo eje que aquél (se considera que la probabilidad en cuestión es proporcional a la densidad de las moléculas recogidas en una placa). Al estudiar detenidamente todo esto se observa que no equivale sino a una nueva, ingeniosa y complicada definición epistémica de probabilidad que es aplicable a cierto dominio de la experiencia.

Naturalmente, existe una relación entre la regla de LAPLACE y la fórmula de MAXWELL para la distribución de velocidades en un gas, y existe una relación entre el método de selección de velocidades que acabamos de ver y otras definiciones operacionales: todo lo que se refiera al campo de las construcciones interpretativas o se halle inmerso en él ha de estar relacionado, en virtud de los requisitos expresados en el capítulo V. Sin embargo, es preciso considerar los procedimientos en cuestión como fórmulas distintas para averiguar probabilidades y, por consiguiente, como definiciones diferentes: cada uno no es, simplemente, otra versión de los otros.

Apuntemos, finalmente, una definición epistémica que, aunque rara vez formulada, es quizá la más usada en la práctica: el actuario se inclina a pensar en la probabilidad como un índice tal que, cuando lo asigna correctamente a un acontecimiento contra el cual asegura a sus clientes, no gana ni pierde dinero.

13.4. LA REGLA DE LAPLACE Y SUS DEFICIENCIAS

Puesto que la fórmula de LAPLACE se considera a veces como *la* definición adecuada de todas las probabilidades, parece oportuno esbozar su ámbito de aplicación y, lo que es más importante, sus limitaciones. El sencillo proceso de contar casos está rodeado por cierto aire de cosa enteramente obvia, y es fácil caer presa de la creencia de que representa todo el contenido de la idea de probabilidad; tentación que se hace más fuerte por el hecho de que siempre haya algo que contar, desde las caras de un dado hasta el número de proposiciones alternativas: parece como si la fórmula funcionase en todas partes, en los juegos de azar, en la física y en la lógica.

Examinando más atentamente la cuestión, sin embargo, se aprecia la necesidad de matizar más, necesidad que surge de la palabra *equiposible,* que aparece en la regla de LAPLACE: si este término se define bien —y sólo bajo esta condición— puede aplicarse la regla. El que funcione adecuadamente al ser aplicada es otra cuestión.

Equiposibles claramente definidos se encuentran predominantemente en tres clases de experiencias. Tenemos en primer lugar el amplio campo de los juegos, donde la atención se centra en alternativas inequívocas: al tirar un dado no queda ninguna duda en lo que se refiere al número obtenido, y ninguna persona razonable alegará que, para un dado simétrico y no cargado, no sean igualmente posibles las caras del 2 y del 4, signifique lo que signifique aquel término; en cuanto a la posibilidad de que un dado quede apoyado sobre una arista, aunque presente, siempre se la considera despreciable. Pero a medida que los juegos se van haciendo más complicados se hace más incierto el significado de lo equiposible, como se verá más adelante.

El tema de la herencia invita también a aplicar la regla de LAPLACE, y por la misma razón: las propiedades observables que en ella entran se disciernen fácilmente, y no suelen ofrecer motivo alguno de diferenciación sobre la base de posibilidades desiguales. Si un guisante es liso o rugoso, su flor axial o terminal, su tallo alto o diminuto, son cosas que pueden averiguarse con suficiente certeza, y cada una de tales alternativas no tiene, intuitivamente al menos, mayor probabilidad que otras; la presencia de caracteres dominantes y recesivos oscurece esta simplicidad, pero, una vez reconocida, hace sumamente convincente lo apropiado que es contar características. En la primitiva ciencia de la genética, por lo tanto, la regla de LAPLACE es una teoría sumamente natural, y su asombroso éxito en la formulación de las leyes de MENDEL hizo mucho para establecerla en las mentes de numerosos biólogos como el supremo o el único significado de la probabilidad. Sin embargo, las observaciones modernas, juntamente con la teoría de los cromosomas en la genética, han tornado más dudosa la significación de la regla al añadir numerosas matizaciones en cuanto a los equiposibles.

Finalmente, la ciencia utiliza la regla dondequiera que los acontecimientos sean *números.* Este hecho explica el predominio de la actitud laplaciana en física y en química, pues son muy frecuentes las situaciones en las que se espera que el resultado sea un número. Ejemplos típicos son el número de bolas de una clase determinada a extraer de una caja en un número determinado de extracciones (que es el prototipo de tantos otros problemas de la ciencia), el número de éxitos en n pruebas independientes de cualquier operación, el número de partículas alfa por segundo emitidas por una fuente de ellas, y las fluctuaciones en el número de moléculas de gas en un volumen dado. También en este caso la plausible sensación de que, intrínsecamente, cualquier número es tan bueno como otro recomienda la regla de LAPLACE.

Hasta aquí nos hemos mostrado demasiado apresurados en nuestro

resumen y excesivamente parciales en favor de LAPLACE; pues aunque superficialmente pueda parecer otra cosa, el significado de los equiposibles no es realmente *nunca* claro y nunca está regulado por la regla en cuestión: su fijación equivale siempre a un postulado especial que convierte lo que parece ser una mera definición de la probabilidad en una teoría acerca de la naturaleza. Aquí aparece uno de los rasgos distintivos de todas las definiciones constitutivas, característicamente unido a la regla de LAPLACE e inequívocamente identificado con ella. Daremos unos cuantos ejemplos para ilustrar estos extremos.

Se ha dicho que en el caso de un dado no puede haber duda acerca de los equiposibles. Pero esto es cierto solamente con respecto a un dado no cargado y, si hemos de mirar más adelante, podría considerarse cierto por razones *físicas*. La misma evidencia inicial marca el lanzamiento al aire de una moneda: hay, sin duda, dos únicos resultados posibles, cara o cruz, y no existe nada que permita asignar a uno de ellos más peso que al otro. Algunos lógicos (como el propio LAPLACE, en realidad) se han sentido vagamente a disgusto en lo referente al origen de este conocimiento acerca de pesos iguales, y han tratado de convertir la ignorancia en información adoptando un "principio de indiferencia", que, según se piensa, certifica la igualdad de pesos cuando no se sepa lo contrario. Teniendo esto presente, veamos el caso de que se arrojen dos monedas en vez de una. Hay aquí tres resultados: la conjunción de dos caras, de dos cruces y de cara y cruz. La regla de LAPLACE puede inducir erróneamente al descuidado a aceptar el valor 1/3 para la probabilidad de obtener dos caras; naturalmente, el lector reflexivo sabe que esto es equivocado: el valor es 1/4. Y esto conduce al laplaciano a considerar que, naturalmente, existen cuatro casos igualmente posibles: dos caras, cara y cruz, cruz y cara y dos cruces.

Ahora bien, resulta equivocado suponer que esto es más evidente que la forma anterior de contar: el hecho es que *debemos* contar de esta forma para lograr el acuerdo con la observación. Muchas paradojas de la teoría de la probabilidad tienen su origen en la incapacidad para examinar cuidadosamente los supuestos acerca de los equiposibles, falta de capacidad que procede de la errónea creencia de que la regla de LAPLACE está dotada de instrumentos para asentar qué casos son equiposibles. Cuanto más complejo es el problema más grave es este defecto. En la sección precedente hemos afirmado que la probabilidad de encontrar todos los ases en las manos de un jugador de bridge —naturalmente, después de barajar concienzudamente los naipes y jugando limpio— era 1/64. Para explicar cómo se computa esta probabilidad deberíamos expresar que se consideraba igualmente probable toda posible distribución de los cuatro ases entre los cuatro jugadores, cosa que apoya la experiencia, si bien no sustancia una hipótesis que a primera vista parece igualmente plausible, a saber, la teoría de que es igualmente probable todo número de ases en una mano dada: esta suposición daría una probabilidad de 1/4 para el resultado en cuestión, lo cual es manifiestamente

erróneo. Y ningún principio de indiferencia sirve de gran cosa en tales circunstancias.

Tomado literalmente este principio, y emparejado con la regla de LAPLACE, conduce a predicciones grotescas, que, siendo ya bien conocidas, sólo es preciso mencionar: mis perspectivas de sobrevivir en el día de hoy son de 1/2, pues sólo hay dos alternativas: supervivencia y muerte; y, como yo no sé nada, el principio de indiferencia me lleva a esta expectativa; del mismo modo, toda persona para mí desconocida es sospechosa en un 50 por 100 de ser un embustero o un asesino. Debe admitirse que este enfoque es injusto para el laplaciano, el cual rechazará justamente nuestra protesta de ignorancia en estos ejemplos, pues sabemos por la experiencia que no son igualmente probables en un día la supervivencia y la muerte. Pero lo que aquí interesa poner de relieve es la incapacidad de la regla de LAPLACE para proporcionar ese conocimiento.

En resumen, pues, la formulación apriorística de la probabilidad es muy corriente y muy útil en las ciencias deductivas. Sin embargo, va siempre aneja a una estipulación externa que estima igualmente probables los acontecimientos o resultados que se sometan a consideración.

13.5. LA DEFINICIÓN FRECUENCIAL Y SUS DEFICIENCIAS

La doctrina frecuencial y su terminología han penetrado en la ciencia física hasta un punto tal que hace conveniente que nos detengamos en algunos de sus detalles; y ello nos colocará también en mejor situación para apreciar adecuadamente las materias que nos conciernen en los dos capítulos siguientes. Como ya hemos indicado, la teoría frecuencial se considera a sí misma en posesión de una larga serie de observaciones, o las postula: pruebas, acciones, acontecimientos, etc.; así, supone que tiene a mano un gran número de tiradas de un dado, de extracciones de bolas de una caja, de observaciones físicas, pruebas de la calidad de un producto manufacturado, etc. Seguiremos la terminología de VON MISES, el más calificado exponente moderno de la teoría frecuencial, llamando a la larga serie un *Kollektiv* o "colectivo", término sinónimo al de "agregado probabilístico", que se encuentra ocasionalmente en la literatura inglesa. En cierto sentido, es preferible esta última expresión, ya que se refiere a algo más específico que un agregado ordinario, una colección ordinaria de pruebas: un *Kollektiv* es, en realidad, una colección muy especial de acontecimientos, un conjunto de ellos suficientemente aleatorio para justificar que lo consideremos desde un punto de vista probabilitario; por ejemplo, el desarrollo en fracción decimal de 1/7 es un agregado de los números enteros de 1 a 9, pero no un agregado probabilístico o "colectivo", mientras que el desarrollo decimal de π sí forma *un* colectivo. Baste con anotar aquí esta distinción; más adelante tendremos ocasión para un breve comentario sobre ella.

Un solo acontecimiento, como la tirada de un dado o la extracción

de un naipe, será denominado un *elemento* del colectivo, y miraremos los elementos como si llevasen números correspondientes al orden en que se presenten en su colectivo (redistribuyendo deliberadamente los elementos en un orden distinto puede uno destruir el carácter de aleatorio del agregado). Cada elemento se caracteriza por una propiedad perteneciente a un grupo de *propiedades* mutuamente excluyentes, como ser un 6, ser un as o hallarse comprendido dentro de un ámbito numérico especificado. El número de elementos que comprende un colectivo es siempre muy grande; en cuanto al número de propiedades, puede ser pequeño (dos al tirar al aire una moneda), ser una infinitud numerable (como al adivinar el número de fallos antes de una tirada que gane; confróntese la paradoja de San Petersburgo estudiada, por ejemplo, por VON MISES [8]), o una infinitud continua (como al medir la longitud de un objeto). En aras de la sencillez limitaremos nuestras observaciones a casos en que el número de propiedades sea finito.

Toda propiedad se presenta con una *frecuencia relativa* definida en un colectivo dado. Con el nombre de frecuencia relativa se designa el cociente entre el número de elementos que posean la propiedad y el número total de elementos. Pero no es preciso definir este término con relación a todo el agregado probabilístico: puede referírselo solamente a los n primeros elementos. La frecuencia relativa de la i-ésima propiedad, dentro de los n primeros elementos de un colectivo, puede escribirse, con una notación obvia, $W_i = n_i/n$. Ahora bien, para el matemático es muy interesante estudiar el comportamiento de W_i, considerada como función de n; en particular, querría saber si su curso es parecido al de ciertas conocidas sucesiones que definen las funciones matemáticas.

Para aclarar estas cuestiones hemos representado en la figura 13.1 *a* los números W_i realmente observados en una sucesión de tiradas de una moneda a medida que n aumentaba (i designa en este caso la propiedad de salir cara). A efectos de comparación, la figura 13.1 *b* muestra el curso de la serie $\sum_{n=0}^{\infty} \left(-\frac{1}{2} \right)^n$, cuyo límite es 2/3. La figura 13.1 *a* está tomada de CRAMÉR [9]. La segunda sucesión se aproxima al valor 2/3 de forma muy regular y segura, mientras que W_i se acerca a su límite más erráticamente. No existe duda alguna en cuanto al hecho de que W_i, a medida que n se hace mayor, tiene cada vez un número mayor de sus valores distribuido en las proximidades de 1/2, pero queda siempre la posibilidad de una desviación arbitrariamente amplia de 1/2 para algunos valores sueltos de n; ésta es una característica de todos los agregados probabilísticos que, además, da origen a ciertas dificultades para enunciar con precisión que se entiende por límite de W_i a medida que n tienda a infinito. Pese a ello, VON MISES y otros autores han definido la *probabilidad* de la

[8] *Op. cit.*

[9] H. CRAMÉR: *Mathematical Methods of Statistics*, Princeton de N. J., Princeton University Press, 1946 [vers. cast.: *Métodos matemáticos de la estadística*, Madrid, Aguilar, 1953].

i-ésima propiedad como $\lim_{n\to\infty} \frac{n_i}{n}$, o bien $w_i = \lim_{n\to\infty} W_i$; al obrar así la palabra *límite* no puede entenderse en su sentido matemático habitual, sino que es menester modificarla de acuerdo con la teoría, más moderna, de los conjuntos de puntos. Para expresar sencillamente las cosas, diremos que el límite *ortodoxo* al que se acerca nuestra serie es un límite que no soporta ninguna desviación finita del valor limitador si n es lo suficientemente grande; el límite *estadístico* tolera desviaciones finitas, pero los

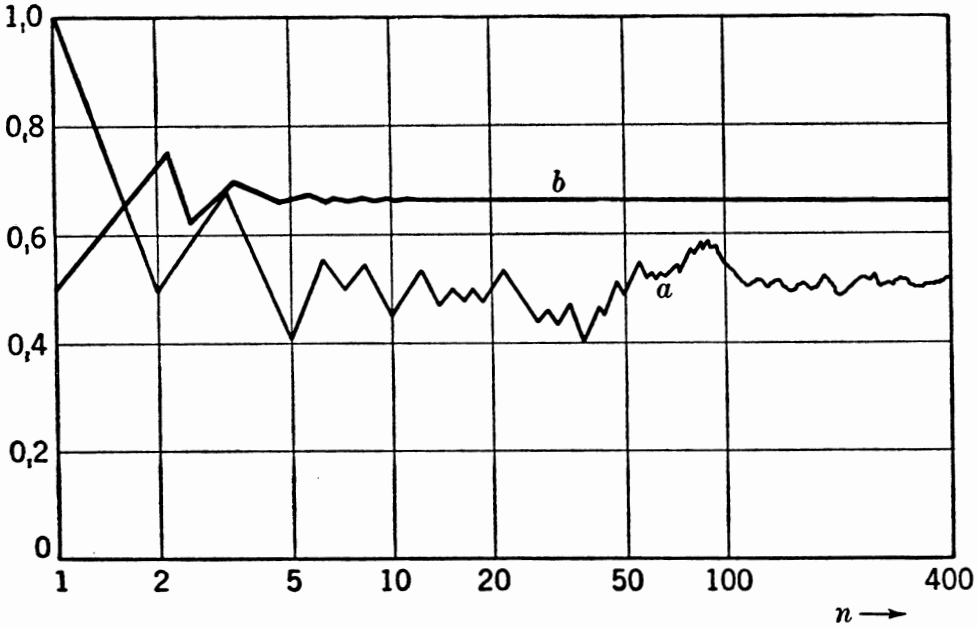


Figura 13.1

números n en que se presentan "forman un conjunto de medida cero", esto es, son despreciables en comparación con aquellos para los que se alcanza el límite [10].

En la práctica, los colectivos no poseen una infinidad de elementos, y el científico se ve siempre obligado a sustituir las probabilidades por frecuencias relativas. Para él, la distinción entre frecuencias y sus límites es más bien académica; la admite, sin embargo, de una manera acusadamente práctica rehusando aplicar el cálculo de probabilidades cuando el número de elementos es demasiado pequeño (cuando no representa una "muestra representativa" de un agregado mayor).

[10] Una idea filosóficamente interesante de esta idea modificada de límite es que una probabilidad de valor 1 va no significa certeza.

No es necesario poner de relieve la gran diferencia de significado entre el cociente laplaciano y W_i. En el caso del dado, aquél es la fracción correspondiente al número de caras, y éste, la proporción de resultados de una determinada clase cuando se lance el dado. Ahora bien, la teoría de la probabilidad no nos da ninguna razón por la que un cociente deba ser igual al otro; el que lo sean es tan notable como el que la fórmula de la caída de un cuerpo se ajuste a los hechos observados (y no más misterioso que esto). Obsérvese también que la probabilidad laplaciana nunca puede ser comprobada *como probabilidad:* todo lo que podemos verificar empíricamente es que el dado tiene, efectivamente, seis caras, una de las cuales tiene un 5, por ejemplo. Esto no carece por sí mismo de fructíferas consecuencias de tipo formal, ya que permite inferir, entre otras cosas, la presencia de doce caras y de dos 5 en dos dados. Pero nunca pasamos desde ahí hasta el otro lado de la valla, en donde suceden realmente los acontecimientos (las tiradas en este caso).

El concepto frecuencial tiene la clase opuesta de limitación: es racionalmente estéril. Siendo un enfoque operacional, nos faculta para medir pero no para predecir probabilidades, excepto a través de una generalización inductiva hacia otros ejemplos similares. Así, sabiendo que la frecuencia relativa de obtener un 5 es 1/6, puedo predecir las expectativas respecto a otras tiradas con este dado, pero no podré decir que la probabilidad de sacar dos cincos con dos dados sea de 1/36: para poder hacerlo, tendría que saltar al otro lado de la valla y luego otra vez acá.

No siempre se comprende esto, ni siquiera en una ciencia tan elaborada como la física: en muchos problemas de la teoría cinética el físico está interesado en saber cuál es la probabilidad de encontrar una determinada clase de moléculas en cierta región del espacio. Empíricamente, se refiere al número n_i de observaciones (realizadas en tal espacio) en las que se encuentren tales moléculas dividido por el número total de observaciones: el colectivo correspondiente consiste en una secuencia temporal de observaciones; pero al razonar sobre la cuestión es probable que se torne laplaciano y compute su probabilidad como el cociente entre el número de *moléculas* especificadas y el número total de *moléculas* presentes. Es frecuente que pasen inadvertidas la manifiesta disparidad de estos dos conceptos y la necesidad de armonizarlos mediante reglas de correspondencia.

La definición frecuencial de la probabilidad tiene ciertas deficiencias propias, de las cuales hemos mencionado ya algunas. Estas imperfecciones no echan a perder su significado ni se interfieren con su utilidad, como tampoco la inexistencia de un equilibrio perfecto acaba con el significado epistémico del peso. Se ve a menudo un inconveniente en la necesidad de introducir una nueva idea de límite matemático; pero es innecesario decir que el verdadero matemático considera esto como una circunstancia afortunada a la que se debe un significativo progreso en su disciplina. Otro inconveniente —y éste constituye en nuestra opinión un grave defecto— radica en la dificultad de decir cuándo un agregado es

suficientemente aleatorio para pasar por colectivo; pues, al parecer, el primitivo intento de VON MISES de definir la aleatoriedad ha fracasado, y es muy probable que fracasen también otros por una razón muy sencilla: ningún agregado que haya sido formado conscientemente (por ejemplo, una serie de números escrita por una persona) puede ser considerado como aleatorio. Para obtener un colectivo es preciso confiarse ciegamente a la naturaleza, echar al aire una perra chica, extraer naipes o confiar en el ruido térmico de un amplificador eléctrico: en un sentido muy peculiar, un agregado probabilístico es "inconstruible"; esto resulta embarazoso para una definición de probabilidad que pretende ser operacional, pues aparentemente no existe ninguna operación humana que sirva para asegurar la presencia del azar en los presuntos colectivos de la naturaleza. En la práctica, sin embargo, existen métodos aceptables para garantizar razonablemente este extremo [11].

13.6. LA CONCEPCIÓN SINTÉTICA

A todo lo largo del presente capítulo hemos hecho hincapié en la compatibilidad de la teoría frecuencial y la teoría laplaciana, pese a sus fundamentales diferencias; de ahí que el presente anuncio de su enlace no ofrezca ninguna sorpresa. La teoría frecuencial proporciona una definición epistémica de la probabilidad, y la fórmula laplaciana una definición constitutiva, y su interacción es evidente en todas las aplicaciones que hemos considerado.

Debe existir, y existe siempre, en los juegos de azar la insinuada afirmación de que las leyes combinatorias (LAPLACE) y las observaciones de frecuencias especificarán la *misma* probabilidad. La tentación de pasar por alto este punto proviene de la circunstancia empírica de que las dos definiciones concuerdan, efectivamente, tan a menudo.

La herencia implica una yuxtaposición de las dos ideas, de un modo quizá más patente. Pues al hablar de *leyes* de la herencia, la genética señala el elemento empírico que radica en la unión de dos probabilidades concebidas de modo distinto: una definida a base de combinaciones de caracteres (o de gametos), la otra apoyándose en frecuencias de aparición de rasgos observables.

Otro tanto puede afirmarse con relación a la tercera gran clase de aplicaciones de la regla de LAPLACE, esto es, cuando entran en juego números. Si una caja contiene dos bolas, una negra y otra blanca, la probabilidad de extraer la bola negra es "evidentemente" 1/2. Pero éste no es un buen ejemplo, porque su simplicidad oculta todos los detalles sig-

[11] Podría muy bien añadirse aquí que las matemáticas de la probabilidad están frecuentemente en discordancia con las reacciones psicológicas ante la aparición de acontecimientos raros. Sobre los aspectos psicológicos de la probabilidad proyecta una interesante luz un ameno estudio de WARREN WEAVER *(Scientific Monthly,* 67:390, 1948), en el que se define un "índice de sorpresa" a base de frecuencias relativas.

nificativos; supongamos, por consiguiente, que la caja contenga una bola negra y tres bolas blancas, y que yo quiera saber la probabilidad de que en seis extracciones sucesivas (reemplazándose cada vez la bola y agitando la caja), sean negras dos de las bolas extraídas. Lo que queremos decir en el aspecto empírico es lo siguiente: yo realizo un conjunto de seis extracciones 100 veces, por ejemplo; luego cuento el número de veces en que dos de las seis bolas eran negras y lo divido por 100. Se obtiene así el valor medido de la probabilidad en cuestión, sin que exista otro camino para hacerlo: la definición de probabilidad es en el presente ejemplo (y en muchos otros) la única definición epistémica.

¿Y cómo se computa esta probabilidad? Siguiendo a BERNOUILLI (que seguía a LAPLACE) contamos el número de maneras en que una bola puede ser extraída de cuatro cajas, luego combinamos cajas similares, y así sucesivamente, obteniendo el valor numérico 1.215/4.096. El modo de efectuar el cálculo no tiene nada que ver con la medición, de suerte que *estamos formulando una teoría física* al determinar este valor como el valor esperado del cociente frecuencial.

De la sola definición frecuencial no se pueden extraer las leyes del cálculo de probabilidades. Las frecuencias por sí solas nunca pueden interpretarse de modo que impliquen los dos teoremas básicos del cálculo, que son: 1) la probabilidad de aparición simultánea de dos acontecimientos independientes es el producto de sus probabilidades, y 2) la probabilidad de que aparezcan uno u otro es su suma. La misión histórica de la teoría de LAPLACE fue la de asentar lógicamente (demostrar) estas leyes y otras muchas extraíbles de ellas. Si en este campo faltaran definiciones constitutivas, el teórico de la probabilidad se encontraría en la misma situación que el geómetra equipado de reglas y compases pero incapaz de utilizar los teoremas de la geometría.

Hemos mencionado ya que se dispone de otras teorías constitutivas de la de LAPLACE; y para ser satisfactorias, tales teorías deben permitir la extracción de las dos leyes básicas arriba enunciadas o deben unirse a teorías que lo hagan. Una de ellas ha estado muy en boga recientemente y ha alcanzado un estado de perfección mucho mayor que el esquema combinatorio de LAPLACE: es la noción de probabilidad basada en los conjuntos de BOREL. (Puede encontrarse una buena exposición de ella en el libro de CRAMÉR ya citado [12], libro en el que se expresa claramente una concepción sintética como la presente.)

No es preciso que nos detengamos aquí a considerar los aspectos técnicos de la teoría de conjuntos; baste decir que esta ciencia abstracta ha desarrollado ciertas cantidades llamadas funciones conjuntistas, que se comportan de modo muy semejante al de las probabilidades laplacianas; además, no fallan en el aspecto combinatorio cuando la gama de propiedades se hace continua, por lo que son, tomadas globalmente, más útiles que estas últimas. CRAMÉR las considera como la contrapartida

[12] CRAMÉR: *Op. cit.*

matemática de las frecuencias relativas, del mismo modo que considera la totalidad de la teoría probabilitaria como un "modelo matemático" de ciertas experiencias comunes. Si el frecuentista, esto es, la persona que rechaza todo menos la formulación frecuencial de la probabilidad, hubiera de transportar sus métodos a la geometría, tendría que definir el punto como el límite de una mancha de tiza sobre una pizarra, la línea como el límite de una franja de tiza, y se vería obligado a demostrar experimentalmente los teoremas de EUCLIDES, según pone de relieve CRAMÉR; a todo lo largo de su libro resulta evidente la necesidad de complementar tales nociones epistémicas con otras, éstas constitutivas.

En el capítulo siguiente examinaremos unas teorías probabilitarias que son también de la variedad constitutiva, pero cuyo campo de aplicación es más limitado. No entran nunca en conflicto con la teoría combinatoria de LAPLACE ni con la teoría de conjuntos, pero suelen proporcionar reglas más detalladas de cálculo de las probabilidades "elementales" o básicas; después de eso, se incorporan pacíficamente a una de estas formas clásicas de teoría científica, y su especificidad se olvida a menudo.

RESUMEN

Tras examinar el significado de la probabilidad en la ciencia y en la disciplina, más reciente, de la lógica inductiva, llegamos a la conclusión de que no son idénticas y de que debe mantenerse una cuidadosa distinción entre la probabilidad científica y la idea de "grado de confirmación" de una proposición lógica, que parece ser el concepto básico de la lógica inductiva. En la presente obra nos limitamos a prestar atención a la primera de ellas.

Como resultado de esta limitación, la probabilidad se convierte en una *cantidad mensurable,* exactamente al mismo nivel que otras, tales como posición, energía, valencia y número atómico. Como todas las magnitudes físicas, la probabilidad comparte el modo dual de definición expuesto en el capítulo XII; y hemos mostrado que los dos principales tratamientos clásicos del problema de la probabilidad, la teoría de LAPLACE y la teoría frecuencial, son complementarios y a la vez necesarios si es que ha de ser científico el razonamiento sobre la probabilidad. La primera proporciona una definición constructiva, la segunda una definición epistémica, y toda aplicación de las probabilidades a la ciencia debe contener aspectos de ambas.

La definición de LAPLACE no es la única constitutiva, ni la teoría frecuencial proporciona la única definición epistémica de la probabilidad: de hecho, muchos complicados formalismos físicos (por ejemplo, la teoría de MAXWELL de los gases y la mecánica estadística de GIBBS) logran para ciertas situaciones físicas exactamente lo que la fórmula de LAPLACE tendía a conseguir para los juegos de azar. No es fácil encontrar otras definiciones epistémicas que puedan parangonarse con la teoría

frecuencial en cuanto a amplitud de aplicación, pero no es totalmente imposible.

Consideradas aisladamente, cada una de las definiciones tiene serias deficiencias, que hemos estudiado en las secciones 13.4 y 13.5. Pero cuando se permite que actúen las definiciones unas sobre otras, tal como ocurre en la práctica científica, se ve que los defectos se anulan mutuamente.

En el último apartado hemos prestado atención a una de las formas más recientes de teoría constitutiva, que está reemplazando rápidamente a la de LAPLACE: cierta teoría basada en las propiedades de los conjuntos borelianos.

BIBLIOGRAFIA

BURES, C. E.: "The Concept of Probability", *Phil. Sci.*, 5:1 (1938).
CRAMÉR, H.: *Random Variables and Probability Distributions*, Londres, Cambridge University Press, 1937.
MISES, R. von: *Wahrscheinlichkeitsrechnung und ihre Anwendung*, Leipzig, 1931.
NAGEL, E.: "Principles of the Theory of the Probability",*International Encyclopedia of Unified Science*, vol. I, núm. 6, Chicago, University of Chicago Press, 1939.
POINCARÉ, H.: *The Foundations of Science*, Nueva York, Science Press, 1929.
REICHENBACH, H.: *Warhscheinlichkeitslehre*, Leiden, 1915.
TODHUNTER, I.: *History of the Theory of Probability*, Londres, Macmillan & Co., Ltd., 1865.
USPENSKY, J. V.: *Introduction to Mathematical Probability*, Nueva York, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1937 [vers. cast.: *Matemáticas de las probabilidades*, Buenos Aires, Nigar, 1947].
VENN, J.: *The Logic of Chance*, Nueva York, The Macmillan Company, 1888.

CAPITULO XIV

LA MECANICA ESTADISTICA

14.1. El problema de la explicación en la mecánica estadística

Como hemos visto en el capítulo XI, los sistemas de la termodinámica son objetos corrientes, sólidos, líquidos y gases con fronteras definidas, si bien los observables que le interesan se hallan algo más distantes de la percepción directa que las propiedades visuales en que centra su atención la mecánica: la temperatura, la presión y la entropía carecen de la inmediatez intuitiva de las posiciones y las velocidades, pues están ligadas a la Naturaleza por correspondencias más dilatadas y complejas y conducen a conceptos más abstractos. Todo esto imprime al problema de la explicación en termodinámica un carácter señero e interesante, y le otorga ciertos rasgos que forman un puente con la mecánica cuántica.

En la termodinámica propiamente dicha, los observables están vinculados por lo que a veces se denominan relaciones *empíricas,* entendiendo el término empírica de un modo muy restringido y específico. Las "leyes del movimiento" de esta ciencia son ecuaciones primitivas que enlazan entre sí los propios observables: en cierto sentido, las leyes no dicen "por qué" los cuerpos se comportan termodinámicamente como lo hacen; cosa que, aunque no implica que los métodos de la termodinámica sean defectuosos, en modo alguno, en cuanto métodos científicos, plantea, sin embargo, la cuestión de la posibilidad de otros modos de explicación, de teorías que "vayan más allá" de la estructura fenomenológica de la termodinámica y de sus suposiciones mínimas. Tal cuestión surge, ante todo, a la vista del postulado de ampliabilidad (capítulo V), que predispone a la ciencia a buscar medios por los que pueda hacerse que el repertorio explicativo de una teoría sea también útil a otras; ahora bien: es evidente que los cuerpos de la termodinámica son también sistemas de la mecánica, y es pertinente, por tanto, preguntar si las leyes de la mecánica pueden producir, o al menos simular, las ecuaciones de la termodinámica.

Pero, como en toda transferencia de una teoría a un terreno distinto del suyo propio, tropieza uno aquí con un obstáculo inicial; aunque los sistemas son los mismos, los observables de la termodinámica son completamente distintos de los de la mecánica: no hay esfuerzo de imaginación que permita afirmar de un punto material o de un cuerpo

rígido que tiene una temperatura o una entropía, o que ejerce una presión. Para que lleguen a fusionarse estas dos teorías, por consiguiente, se requiere, ante todo, una reinterpretación de los observables de una a base de los observables de la otra; lo cual, de hecho, alarga apreciablemente las cadenas de correspondencia que proporcionan las definiciones epistémicas para las cantidades en cuestión. Ello se ve claramente con el ejemplo de la temperatura, en el que, para que siga teniendo sentido, es preciso complementar la usual definición operacional, que hace referencia a los termómetros, con algún término análogo del lado estadístico *(v. gr.,* la energía cinética de las moléculas). O, enfocando la cuestión de otra manera, este procedimiento proporciona nuevas definiciones constitutivas para cantidades termodinámicas, pues la cadena se alarga exclusivamente en el espacio de las construcciones interpretativas, como ya hemos apuntado en el ejemplo de la temperatura. La misma ampliación formal tiene lugar cuando asociamos la presión (para la que disponemos ya de una definición operacional que se vale de manómetros) con la fuerza media de unos impactos moleculares por unidad de superficie. Es más sencillo, quizá, considerar estas dos adiciones a las reglas de correspondencia como nuevas definiciones constitutivas; por este camino encontramos, entonces, que la lectura del viejo termómetro se convierte ahora en un "módulo de distribución fásica" (GIBBS) o en la energía cinética media de las moléculas que formen el sistema.

La reinterpretación mecánica de los observables termodinámicos y, con ella, la reducción de todas las ecuaciones termodinámicas se realizan en la mecánica estadística. Ni la reinterpretación de observables ni la reducción de ecuaciones son posibles valiéndose solamente de las herramientas pertinentes de la mecánica, sino que, para conseguir estos fines, se precisan construcciones interpretativas adicionales, ajenas a la mecánica y a la termodinámica: son de tipo estadístico, e involucran de modo esencial la noción de probabilidad. La mecánica estadística es, por consiguiente, una disciplina por derecho propio, relacionada con la mecánica, pero que opera con ciertas nociones nuevas, que le son peculiares. Por qué y dónde interviene la probabilidad es una cuestión que queremos ver ahora.

Para mayor concreción, elegimos una magnitud termodinámica, la presión, y estudiamos qué es lo que implica su reinterpretación. Puede considerarse que el sistema sea un gas encerrado en una vasija. Como observable termodinámico, la presión del gas es la fuerza ejercida por el gas sobre la unidad de superficie de sus paredes; al aplicar sin complementación alguna los conceptos de la mecánica—suponiendo, naturalmente, lo que siempre se da por sentado, a saber: que el gas se compone de muchas moléculas—, esta presión se convierte en la totalidad del impulso perdido por unidad de tiempo por las moléculas que golpeen en la unidad de superficie. Hasta ahora no se ha introducido nada nuevo, y si tan simple transición completase la reinterpretación de la mecánica estadística, ésta sería una parte de la mecánica ordinaria.

Surge, sin embargo, una dificultad cuando se observa que la presión termodinámica es constante, mientras que su contrapartida mecánica, tal y como acabamos de interpretarla, varía erráticamente en el tiempo y, en realidad, de un punto a otro de la superficie. Sería difícil elegir ningún valor como representativo de la presión termodinámica medida. Expongamos la cuestión en los términos previamente explicados: según una definición, el observable es algo *poseído* por el sistema físico; según la otra, es *latente.* Ahora bien: los observables latentes no contienen nada intrínsecamente objetable, como ya hemos indicado y más adelante veremos con mayor extensión; pero la ciencia los acepta sólo a la fuerza y a modo de último recurso. En este ejemplo, la experimentación muestra claramente que la presión es una cantidad de la variedad relativamente estable y poseída, pero nuestra presente teoría no permite entenderla así.

La tarea, entonces, consiste en convertir el observable latente en uno poseído, y ello se consigue apelando a la estadística. Para verse libre de las rápidas fluctuaciones de ritmo a que las moléculas aplican un impulso a las paredes de la vasija, es preciso recurrir a algún proceso de promediación: tal vez deba tomarse el valor medio de la cantidad dinámica que es el impulso por segundo en el punto que se haya de medir la presión y a lo largo de un período de tiempo suficiente; tal vez se deba tomar el promedio de esta cantidad en cualquier instante dado sobre toda la pared del recipiente; quizá deba seguirse el movimiento de una determinada molécula en su curso de un lado a otro dentro del recipiente, tomar debida nota de sus colisiones con otras moléculas en su recorrido, computar el impulso medio cedido a las paredes en un solo impacto y multiplicarlo por el número de impactos por segundo. Puede sacarse partido de todas estas posibilidades; pero los principios de la mecánica son completamente indiferentes respecto a cuál de las elecciones será la mejor.

Lo que se requiere es la introducción de algún colectivo, la atribución de probabilidades a sus propiedades y el subsiguiente cálculo del valor medio de la magnitud dinámica que nos interesa. En cuanto a los acontecimientos que formen el colectivo, pueden ser los sucesivos impactos de una molécula dada o de un grupo especificado de moléculas; también pueden ser las colisiones simultáneas de muchas moléculas con la pared en un instante dado: la mecánica no dicta cuál ha de ser el agregado probabilístico y la ciencia puede elegir uno que funcione, que conduzca a un acuerdo con la experiencia sensorial termodinámica.

Ahora bien: lo que sucede es que funcionan con éxito varios de ellos. No es corriente semejante generosidad del destino en la mayoría de los dominios de la ciencia física, pero en la dinámica estadística encontramos, al parecer, una desconcertante profusión de construcciones explicativas posibles y fructuosas; por ello existen varias ramas de la mecánica estadística, de las cuales expondremos dos en las dos secciones siguientes. En el próximo capítulo examinaremos los problemas que

esta ambigüedad suscita con respecto a la "realidad", que permanece todavía sin definir.

Pero antes de abordar nuestro detallado examen, creemos oportuno insertar unas advertencias previas y una referencia a páginas posteriores. La mecánica estadística logra convertir los observables latentes en poseídos introduciendo los agregados probabilísticos adecuados; pero no debe concluirse, sin embargo, que tal estratagema dé resultado en todas las demás partes de la física: en el capítulo XVI ciertos observables resultarán ser latentes y *no* convertibles de esta forma ni de ninguna otra conocida. Algunos científicos, a la vista del múltiple éxito de la mecánica estadística, han creído que *debería* existir un agregado probabilístico por el que se pudiese eliminar la latencia de los observables; pero su búsqueda ha sido vana en la mecánica cuántica, y la creencia de que los "observables dispersos" son siempre indicativos de un eslabón perdido, que habría de hallarse en unas propiedades ocultas reguladas por un agregado estadístico, ha impedido, en ocasiones, que se comprendiera perfectamente esta disciplina: las teorías de la mecánica estadística no ofrecen ningún remedio *universal* para las extravagancias de los observables latentes.

Hemos descrito antes el tránsito desde la termodinámica hasta la mecánica estadística referido a una magnitud, la presión, P; y tal descripción podría repetirse en forma análoga para otras variables, en particular, la temperatura, T, la energía interna, U, y la entropía, S: en cada uno de estos casos puede ponerse de manifiesto la necesidad de hacer referencia a un agregado probabilístico. Pero la relación entre la magnitud termodinámica y su contrapartida estadística es generalmente mucho menos obvia que en el caso de P, que estamos considerando: las leyes de la mecánica sugieren la identificación de la "tasa media de transferencia del impulso" con la presión, aun cuando se deje sin especificar la clase de media, pero la identificación de T con la energía cinética media de las moléculas (expresada en unidades adecuadas) no es objeto de sugerencia análoga alguna, aun cuando es preciso efectuarla para garantizar la obtención de uno de los tipos posibles de estadística (la de BOLTZMANN); y no menos remota es la vinculación entre la entropía y "el valor medio del logaritmo de la extensión fásica" (GIBBS)[1]. Por otra parte, U se relaciona muy plausiblemente con su pareja estadística, la energía total del sistema. A la vista de estos hechos, los científicos se han acostumbrado a denominar a las construcciones interpretativas que están relacionadas, del lado estadístico, con las magnitudes termodinámicas P, T, U, S, etc., sus *análogos estadísticos*, admitiendo así la diferencia genética de estos últimos conceptos. Lo que esto significa teniendo en cuenta la metodología desarrollada en este libro es claro: las formulaciones termodinámicas de P, T, U y S son las definiciones epistémicas

[1] El lector filosófico no necesita preocuparse por el significado exacto de estos términos: no extraeremos de ellos ninguna conclusión específica.

de estas magnitudes; y los análogos estadísticos son sus definiciones constitutivas (no las únicas, sin embargo).

Puede verse ahora fácilmente el esbozo general del problema de la explicación en la termodinámica estadística: consiste en formular relaciones matemáticas entre los análogos que correspondan a las existentes entre las cantidades termodinámicas mismas; y una vez hecho esto, queda terminada la misión de nuestra actual disciplina. La mecánica estadística no está llamada a proporcionar razones mecánicas por las que, por ejemplo, deba aparecer la entropía como el valor medio cambiado de signo del logaritmo de una extensión fásica: no necesita "explicar" estas un tanto largas reglas de correspondencia (que, por otra parte, tampoco cabría advertir mirando la Naturaleza); *lo que parece ser una simple yuxtaposición de impresiones sensoriales y objeto externo en el ingenuo acto de reconocer una cosa (y que, por consiguiente, difícilmente exige nada tan complicado como una regla de correspondencia) resulta ser algo sumamente complejo, casi arbitrario, y que necesita someterse a detenido examen por una ciencia como la mecánica estadística.* Esperamos que esto nos exima de la acusación de haber hecho innecesariamente complicada la metodología de la ciencia mediante la introducción de correspondencias. A su debido tiempo estudiaremos otras teorías que no pueden ser comprendidas sin ellas.

14.2. La teoría de Gibbs [2]

Un cuerpo termodinámico, considerado como sistema mecánico, tiene un estado *dinámico* (cf. el capítulo IX) que puede ser especificado a base de cierto número de coordenadas y un número igual de impulsos. Si admitimos que el sistema está compuesto de M moléculas, dicho número es $3M$, ya que la posición de cada molécula está caracterizada por sus componentes x, y y z; no es necesario, sin embargo, adoptar una postura definida en lo que se refiere a la composición de tal cuerpo: es posible proceder con mayor generalidad suponiendo que sea un sistema dinámico con cierto número de grados de libertad (éste, como se recordará, es el mínimo número de coordenadas preciso para especificar la configuración mecánica del cuerpo), el cual llamaremos n. Para el caso especial de una masa gaseosa formada por M moléculas, $n=3M$, y el *estado* completo (no meramente su configuración o su "posición" generalizada) es representable entonces por $2n$ números: n coordenadas y n impulsos.

Ahora bien: $2n$ es un número enorme, fácilmente del orden de 10^{24}; pese a lo cual, conviene imaginarse todas las coordenadas e impulsos como si se conociesen, como si estuviesen, quizá, tabulados en un enorme

[2] El lector puede saltarse esta sección y la siguiente sin romper la continuidad de nuestra exposición.

libro con 10^{24} anotaciones diferentes. (Si tal libro tuviese 500 anotaciones por página, tendría un grueso de unos 10 años/luz.) A medida que cambie el estado del cuerpo (por ejemplo, a medida que sus moléculas se muevan) habría que cambiar algunas de las anotaciones, o todas.

Puesto que este trabajo de contabilidad es totalmente imposible, podría también formarse una concepción más elegante del estado a lo largo de sus modificaciones. Para ilustrarlo, perdamos de vista por un momento el enjambre de partículas que componen el gas y consideremos la clase más sencilla de sistema mecánico: un punto material, quizá una molécula única, moviéndose a lo largo del eje x, no tiene sino un grado de libertad, y puede especificarse su estado completo por medio de dos números, x y p; en vez de anotarlos en un libro, supongámoslos situados sobre un gráfico con x como abscisa y p como ordenada. El par de números se representa entonces por un punto de un plano o, en lenguaje más técnico, por un punto en un espacio de dos dimensiones. A medida que la molécula se mueve, su punto representativo describe una curva en el plano.

La *claridad* de este procedimiento desaparece cuando se aplica a sistemas menos sencillos: una molécula moviéndose sobre un *plano,* que es un espacio de *dos* dimensiones, requiere x, y, p_x, p_y, esto es, *cuatro* números para su descripción completa, números que corresponden a un punto en cuatro dimensiones. Sin importarle que no fuera posible imaginarla, GIBBS conservó la construcción de espacios multidimensionales y la amplió de acuerdo con sus necesidades (en realidad, ciertas teorías dinámicas habían utilizado ya mucho antes espacios multidimensionales).

Un sistema con n grados de libertad y, por consiguiente, con $2n$ variables de estado, está representado por un punto en un espacio de $2n$ dimensiones, y los cambios en el estado del sistema se indican con movimientos del punto representativo a lo largo de una curva en el espacio $2n$-dimensional. Este peregrino movimiento en hiperespacios no es sólo una bonita concepción, sino que proporciona también un útil formalismo para el pensamiento exacto y una ayuda en el análisis, pues, aunque tal vez no lo capte uno adecuadamente por intuición, tal espacio tiene propiedades matemáticas muy sencillas: permite, por ejemplo, una generalización fácil de teoremas geométricos básicos, tales como el de PITÁGORAS y el teorema de GAUSS de la divergencia. Para el científico, su uso no es un resignarse a lo misterioso, ya que sus propiedades se conocen muy claramente. El espacio multidimensional recibe el nombre de *espacio fásico o de fases* del sistema termodinámico.

El curso dinámico del sistema queda así representado por una curva en el espacio de fases, curva cuyas propiedades son realmente interesantes: se sabe, por ejemplo, que nunca puede cortarse a sí misma y que, a menos que sea periódica, acaba por ocupar todo el volumen de su espacio; todo esto y mucho más se ha demostrado a partir de los principios de la dinámica. Puesto que todo observable dinámico (energía, momento total, momento angular, etc.) del sistema es función de las

$2n$ variables que componen las dimensiones del espacio de fases, a cada punto de tal espacio se le asocia un valor definido de cada observable. Por ello, el camino recorrido por el punto representativo móvil señala una sucesión específica de valores para cada observable: viendo *dónde* está el punto en el espacio de fases en este instante, sabemos cuál es la energía del cuerpo, su momento (o impulso), etc.; y también sabemos que estos valores fluctúan rápidamente de un instante a otro y no nos revelan gran cosa acerca de los observables termodinámicos (por ejemplo, la presión).

En esta coyuntura, GIBBS introduce un extraño colectivo con el fin de tomar valores medios: construye un *conjunto* de sistemas; esto es, imagina un gran número de sistemas termodinámicos, todos ellos semejantes al dado: si éste es un recipiente lleno de gas, él imagina millones de recipientes similares, llenos todos ellos con la misma cantidad del mismo gas. Los estados dinámicos de estos sistemas no serán idénticos, en general: cada miembro del conjunto tendrá su destino, representado por un punto moviéndose en el espacio de fases, y todo el conjunto, al ser contemplalo en ese espacio, aparecerá como una nube de polvo, en la que cada partícula que lo constituya seguirá su propio camino. La densidad de esta nube de polvo diferirá de un lugar a otro, y puede cambiar en el tiempo en cualquier lugar dado; sin embargo, según puede demostrarse, cada partícula obedece a ciertas constricciones sociales, pese a sus hábitos nómadas: nunca choca con ninguna otra partícula de polvo, y visita todas las partes de su mundo.

Entre todos los estados posibles de movimiento de la nube de polvo hay uno singularmente interesante: aquél en el que la densidad en cada punto del espacio de fases permanece constante en el tiempo. Esto, dice GIBBS, corresponde al *equilibrio* del sistema termodinámico (o del conjunto, si lo prefieren); y, puesto que las leyes termodinámicas se aplican solamente a las condiciones de equilibrio, puede confinarse la atención a este estado de movimiento. Aunque la terminología es un tanto imprecisa, nos referiremos a la situación de densidad constante de la nube llamándola la *distribución canónica* de los puntos representativos correspondientes al conjunto. En su distribución canónica la nube no está inmóvil: los puntos se mueven de una manera tal que deja inmutable la densidad de todos los puntos. Nuestra atmósfera es un ejemplo concreto de este estado de movimiento en tres dimensiones, siempre que prescindamos del viento: las moléculas atmosféricas se mueven y hacen, sin embargo, que la densidad a una altura dada sea constante.

El atractivo de la teoría de GIBBS radica en lo siguiente: si promediamos la *tasa de pérdida de impulso* por unidad de superficie de pared de toda la nube de polvo estacionaria (nuestra distribución canónica), obtenemos el valor correcto de la *presión* del sistema real; si promediamos la *energía* de la distribución canónica, hallamos el valor correcto de la *energía interna* del sistema real; y para todas las demás variables termodinámicas se obtienen resultados análogos. Además (cosa que re-

sulta bastante sorprendente), *la distribución canónica prescribe las probabilidades* (densidades de nube en diferentes lugares del espacio de fases) *que deben tener los diversos valores posibles de un observable para dar origen al valor medio correcto.* Con ayuda de la distribución canónica los observables latentes pueden convertirse en magnitudes poseídas y estacionarias.

De esta manera se obtienen *análogos estadísticos* para todas las variables termodinámicas. Así, la temperatura corresponde a cierto parámetro que aparece en la expresión matemática de la distribución canónica. La palabra *corresponde* se utiliza aquí en el preciso sentido de nuestras primeras reglas de correspondencia, a saber: la construcción interpretativa "temperatura" está definida constitutivamente, sin referencia ninguna a mediciones, por la teoría de GIBBS, en donde aparece bajo forma de la cantidad θ en la expresión de la distribución canónica, $P=e^{\frac{\psi-H}{\theta}}$; y la regla de correspondencia, o definición epistémica, dice que θ está relacionada con lecturas de termómetros, y así sucesivamente. De forma similar, todas las demás magnitudes termodinámicas tienen análogos que son valores medios de variables dinámicas convenientemente elegidas, y los promedios se obtienen con ayuda de la distribución canónica y del conjunto que ella implica [3].

No sería sorprendente que, durante la precedente exposición, que pasaba rápidamente de una desacostumbrada noción a otra, el lector hubiese perdido de vista las principales cuestiones metodológicas. Giraban en torno a la tarea de encontrar cierto valor medio para observables rápidamente fluctuantes. Mas, para encontrar un valor medio, hay que conocer los pesos (esto es, las posibilidades) de los acontecimientos individuales; la dinámica no nos los proporcionaba, de modo que se ha hecho necesario postular un agregado probabilístico en el que los valores de los observables dinámicos sean los elementos; y la teoría de GIBBS ha sido ese postulado. Decía ésta, en efecto: la probabilidad de que un valor r pertenezca a un observable dinámico es proporcional a la densidad D de la nube canónica existente en el lugar del espacio de fases donde el observable tenga el valor r; por lo cual, conocer D en función de r es el único requisito para computar el valor medio. La teoría de GIBBS es un conjunto válido de reglas para obtener D, esto es, para encontrar las probabilidades.

No se acostumbra clasificar esta forma de la mecánica estadística entre las teorías de la probabilidad; sin embargo, ése es el lugar a que propiamente pertenece: como instrumento científico habría que colocarla junto a la regla de LAPLACE, regla que indica cómo construir la probabi-

---

[5] Para los detalles matemáticos, consúltese a J. W. GIBBS: *Collected Works.* Vol. 2, Parte I, *Elementary Principles in Statistical Mechanics.* Para una exposición más breve, véase LINDSAY y MARGENAU, Nueva York, John Wiley & Sons, Inc., 1936, pág. 218.

lidad de sacar "cara" con una moneda, un 5 con un dado, etc., y equivale, pues, a una definición constitutiva sustanciada por la experiencia en términos frecuenciales. La mecánica estadística de GIBBS y todas las demás formas de esta mecánica son doctrinas que cumplen adecuadamente su finalidad y facultan al científico para construir las probabilidades necesarias para explicar la termodinámica; así, pues, lo mismo que la regla de LAPLACE, la teoría de GIBBS equivale a un grupo de definiciones constitutivas que se someten a prueba y confirman mediante mediciones.

Difícilmente pueden soslayarse ciertas cuestiones cuando se revisa el contenido de esta sección. ¿Qué derecho tiene el científico a postular un conjunto tan curioso como el de GIBBS, a inventar innumerables réplicas al único sistema dado? ¿Cómo puede describir tal extravagancia el mundo real? Pasamos aquí por alto estas cuestiones, pero volveremos sobre ellas en el capítulo siguiente.

14.3. OTROS TIPOS DE MECÁNICA ESTADÍSTICA

La mecánica estadística es una de las raras disciplinas de la ciencia física en la que coexisten varias teorías rivales, manteniéndose todas en buena armonía. La que acabamos de describir es elegante, pero tiene numerosos y notables defectos: presta muy poca atención a la estructura molecular de los sistemas termodinámicos, con lo que evita tomar contacto con hechos conocidos en otros campos y posee cierto aire peculiar de aislamiento. Asimismo, al introducir las probabilidades valiéndose de conjuntos consigue lo que buscaba, pero no iluminarnos, pues sustrae a la consideración todos los detalles de lo que suceda físicamente. Y, por último, ha resultado ser notoriamente difícil el armonizar la estadística de GIBBS con la teoría de los *cuantos*: cabe hacerlo, desde luego, pero en el proceso tendente a lograr la armonía se descubre que pierden su atractivo el conjunto de GIBBS, el espacio de fases y la distribución canónica, ya que las partículas de polvo desarrollan el fastidioso hábito de saltar discontinuamente de un lugar a otro, y evitan ciertas regiones de tal espacio. Por consiguiente, los físicos y químicos se han interesado por otra forma posible de estadística.

BOLTZMANN figuró entre los primeros creadores de un método de este tipo, denominado frecuentemente con su nombre, y elevado recientemente a una mayor perfección por los dos físicos británicos DARWIN y FOWLER. Si bien existen ciertas diferencias entre su forma original y la final, vamos a describir esencialmente esta última, utilizando en conjunto la terminología de los investigadores nombrados en último término. La teoría en cuestión reconoce desde el principio la estructura molecular de la materia, basando todo su proceder en este reconocimiento; y logra también con ello satisfacer las exigencias de la teoría cuántica.

En vez de considerar el número de *grados de libertad* del cuerpo

termodinámico, como hicimos en la sección precedente, prestemos ahora atención a las moléculas que constituyan ese cuerpo: supongamos que las numeramos desde 1 hasta N (el esfuerzo a que se ve sometida nuestra imaginación por esta sugerencia es tan grande como el producido por el conjunto de GIBBS; pero la facilidad de "ver" las partículas en movimiento hace al esfuerzo menos desagradable de soportar); y cada molécula puede asumir cualquier valor de un observable: su velocidad, por ejemplo, puede ser 1,5 cm/seg, 1.000 cm/seg, etc., y su energía puede ser de 1 ergio, 10^{-16} ergios o cualquier otro valor. Para mayor concreción, limitemos nuestra atención a un solo observable específico, la energía.

Ahora bien: no es igualmente probable (ateniéndonos a razones mecánicas) que una sola molécula cuyo movimiento no esté enteramente especificado posea una energía de 1 ergio o de 10^{-16} ergios: de hecho, es mucho más probable el primer valor, como puede demostrarse por los principios de la dinámica[4]; es decir, hay más estados de movimiento en los que una sola molécula encerrada en un recipiente puede tener una energía de 1 ergio que de 10^{-16} ergios (en esta fase no están involucrados los problemas de estadística graves). Para evitar complicaciones innecesarias, vamos a considerar la escala de la energía dividida en pequeños segmentos de diferentes longitudes, y tales que las longitudes estén acopladas entre sí de tal modo que hagan igualmente probable, mecánicamente, que una molécula posea la energía correspondiente a un segmento que la de otro segmento cualquiera. (Estos segmentos estarán también rotulados con números.)

Las suposiciones *estadísticas* intervienen cuando transferimos la atención desde una única molécula a la reunión de N *moléculas,* el cuerpo termodinámico. Para ver esto claramente es útil distinguir dos clases de estados con referencia a esa reunión.

1. El primero recibe el nombre de estado *microscópico.* Es una detallada asignación de moléculas individuales a segmentos de energía, expresada por una declaración que adopta la siguiente forma: las moléculas números 5, 691 y 1.959, caen en el segmento número 1 (esto es, tienen energía dentro de ese radio); las moléculas 11 y 750 caen en el segmento 2; etc., hasta que todas las moléculas estén asignadas a sus segmentos apropiados. Cuando se conoce un estado microscópico puede calcularse la energía total del conjunto sumando las energías de las moléculas individuales.

2. Un estado *macroscópico* del conjunto se define de la siguiente manera: hay tres moléculas en el segmento 1, dos moléculas en el segmento 2, etc., hasta que quede especificado el *número* de ocupantes de cada segmento. Ahora carece de importancia cuáles sean las moléculas individuales que residan en el segmento 1, cuáles en el segmento 2,

[4] Para ser exactos debería decirse: la probabilidad de que una molécula tenga una energía entre E y $E+\Delta E$ es mayor cuanto mayor sea E, siempre que ΔE sea constante. Obsérvese que esto no sería cierto si fuesen impuestas condiciones extrañas, tales como la constancia de la energía media.

etcétera; se necesita, pues, mucha menos información para describir un estado macroscópico que uno microscópico, y, sin embargo, la energía total del conjunto es fija y computable cuando se conoce el estado macroscópico, pues no importa qué moléculas particulares tengan una energía dada, siempre que esté dado su número. El extremo a destacar es que un único estado macroscópico "contiene", como si dijéramos, un considerable número de estados microscópicos (o es compatible con él).

Si, en nuestro ejemplo, la molécula 5 fuese trasladada desde el segmento de energía 1 al 2, mientras que al mismo tiempo la molécula 750 fuese trasladada desde el 2 al 1, resultaría un nuevo estado microscópico, pero el estado macroscópico y, por consiguiente, la energía total del sistema permanecerían invariables. De esta forma se ve que el número de estados microscópicos contenidos en uno macroscópico es igual al número de permutaciones de moléculas entre diferentes segmentos de energía [5].

Por lo que al cuerpo termodinámico se refiere, nuestro interés se limita a los estados macroscópicos: cualquier propiedad observable tiene el mismo valor para todos los estados microscópicos (llamados a veces configuraciones) que formen uno macroscópico. De ahí que para hallar el valor medio de un observable sea suficiente calcular su promedio en todos estos últimos estados. El problema que nos ocupa parece resuelto, por consiguiente.

Está resuelto excepto por lo que se refiere a un detalle. ¿Qué es lo que hemos de considerar como pesos: las probabilidades de los diferentes estados macroscópicos? Esta cuestión no se planteaba en la teoría de GIBBS [6]; es preciso resolverla aquí mediante un postulado especial, que caracteriza la forma de la estadística a que ahora nos estamos refiriendo; y dicho postulado afirma que *la probabilidad de un estado macroscópico es proporcional al número de estados microscópicos que contenga.*

Una vez más, es una suposición que parece razonable, pero que no está dictada por las leyes de la mecánica: su virtud sale a luz en sus consecuencias, pues conduce a un acuerdo entre los valores medios computados y las cantidades medidas de la termodinámica. Los análogos estadísticos son diferentes en esta teoría de los correspondientes a la de GIBBS, pero satisfacen las relaciones termodinámicas correctas.

No es necesario señalar una vez más la primordial función de esta forma de mecánica estadística en cuanto teoría de la probabilidad: al igual que la regla de LAPLACE, indica cómo se han de construir las probabilidades que resultan ser válidas en las observaciones físicas.

---

[5] El lector versado en el álgebra combinatoria reconocerá que este número es $N!/N_1!N_2!$ ..., supuesto que N_i sea el número de moléculas en el segmento i.

[6] Por lo menos no de esta forma. GIBBS la soslayó postulando que las probabilidades sean proporcionales a las densidades de su nube canónica.

14.4. Estadística e ignorancia

La mecánica estadística es un eslabón entre la termodinámica y la mecánica: logra *casi* reducir una a otra. La razón de su fracaso parcial estriba en la necesidad que tiene de introducir probabilidades, que son cantidades que los conceptos de la mecánica desconocen. Cierto que los principios dinámicos toleran el uso de probabilidades en ciertos problemas especiales, en los que no se conozca completamente el estado inicial de un sistema mecánico, pero aun entonces no ofrecen ninguna ayuda para engendrar probabilidades: es preciso introducir éstas inicialmente mediante consideraciones de tipo no dinámico, ya que la competencia de las leyes de la dinámica se limita a la *transformación* de un grupo de probabilidades en otro. Un ejemplo aclarará lo que queremos decir.

En el cielo aparece un nuevo cometa, y es visible solamente durante un corto período de tiempo; las mediciones no han sido lo bastante exactas para fijar su posición con certidumbre normal, pero por unas cuantas observaciones dispersas es posible atribuir probabilidades a sus diversas posiciones durante el período de observación. Evidentemente, no puede responderse con precisión a la pregunta de cuándo se volverá a ver de nuevo tal objeto sobre la tierra; es posible, sin embargo, calcular la *probabilidad* de que vuelva en cualquier momento dado si y solamente si se da por supuesta la asignación de probabilidades iniciales, que no tiene nada que ver con las leyes del movimiento; y de manera parecida se puede calcular el momento *más probable* de regreso. Se ve cómo las leyes de la mecánica actúan con perfecta precisión y cómo transforman las probabilidades correspondientes a un agregado de condiciones iniciales en otro conjunto de probabilidades referentes a la información deseada. Este ejemplo pone de relieve una característica que, en general, poseen los principios de la mecánica: la probabilidad es un elemento ajeno a esta ciencia; no surge naturalmente al aplicar tales principios, sino que es preciso inyectarla en ellos desde fuera para que funcione en la descripción mecánica. De ahí el fracaso de la mecánica estadística al tratar de efectuar una reducción total de la termodinámica a la mecánica.

El papel central desempeñado por la probabilidad en el tema que estamos estudiando exige precisar dos cuestiones. Primera, ¿qué efecto tiene el uso de probabilidades en la mecánica estadística sobre la certidumbre de las leyes termodinámicas? Y segundo, la necesidad de introducirlas, ¿proviene de la ignorancia de las condiciones físicas, como en el ejemplo del cometa, y permitirá, acaso, un conocimiento más completo su eliminación?

1. La primera cuestión ya ha sido rozada en el capítulo XI; podemos ahora ampliar y confirmar las declaraciones hechas allí. Los dos tipos de estadística que hemos elegido para presentarlos conducen a la misma conclusión; y por esta razón podemos limitar nuestras observa-

ciones a la forma de BOLTZMANN. Su suposición básica hace que la probabilidad de un estado macroscópico sea proporcional al número de estados microscópicos que lo compongan; por consiguiente, un estado en el que la energía del sistema termodinámico se distribuya uniformemente entre todas sus moléculas tiene una probabilidad mucho mayor que cualquier estado en que unas moléculas posean toda la energía y otras ninguna. Sin embargo, debido a que esta última situación tiene una probabilidad finita—aunque sumamente pequeña—deberíamos esperar que se realizara quizá una sola vez en mucho tiempo: ése sería el acontecimiento en que parte del agua contenida en una olla se helase mientras el resto hirviera.

El que uno tome en serio esta expectativa depende de si considera o no la mecánica estadística como una *explicación* de la termodinámica en el sentido de que le sea lógicamente anterior (a efectos prácticos, la decisión carece de importancia, y la coherencia es posible tanto de un modo como del otro). Como el punto de vista estadístico proporciona una ampliación de la teoría molecular, su aceptación como lógicamente anterior a la termodinámica se ve favorecida por los principios metodológicos y es, en consecuencia, predominante, pese a su precio (o sea, al estorbo que las probabilidades representan para las leyes de la termodinámica). La respuesta a nuestra primera pregunta es, por lo tanto, clara. Si se considera a la mecánica estadística lógicamente anterior a la termodinámica, si no es simplemente un instrumento útil para producir leyes formalmente análogas a las de la termodinámica, entonces éstas no operan con certidumbre.

Antes de abordar la cuestión número 2 conviene considerar las consecuencias de esta postura con respecto a uno de los principios de la termodinámica, la famosa segunda Ley. Interpretada de acuerdo con lo anteriormente expuesto, la segunda Ley afirma simplemente el paso del sistema a complexiones moleculares cada vez más probables a medida que pase el tiempo; o sea, a desplegar al máximo las posibilidades de estados microscópicos; lo cual conduce a los conocidos resultados—igualación de la temperatura y de la presión, tendencia expansiva de los gases, difusión—y suscita también la perspectiva de una *muerte térmica* del universo. Esta hipotético estado futuro se realizará conforme a las leyes de la termodinámica cuando todas las moléculas hayan alcanzado su estado más probable y sea uniforme la temperatura de toda la creación; el calor no podrá entonces seguir fluyendo, ni será posible otra cosa que una transferencia aleatoria de materia. Un estancamiento absoluto envolverá al mundo, y la vida habrá de cesar.

Pero la mecánica estadística, si bien permite concebir fácilmente este proceso, cualifica también esta perspectiva de forma muy importante: el raro suceso en el que parte del agua se hiela y el resto se evapora sería una inversión del curso probable, y toda inversión de este tipo actúa en contra de la muerte térmica, aunque no puede impedirla; no está fuera de cuestión, sin embargo, que después de un tiempo muy largo

la situación de estancamiento desaparezca por una regeneración espontánea del movimiento, de modo muy semejante a aquél en que la frecuencia relativa de la figura 13.1, después de haber alcanzado prácticamente el límite, tuerce hacia una desviación finita. La idea de un universo que se rejuvenece periódicamente no es, por consiguiente, un absurdo científico.

Debido al enorme tamaño de nuestro macrocosmos, hay otros argumentos, aún más poderosos, que se oponen a la perspectiva de una muerte térmica última si su contenido es infinito, o si la creación de materia-energía tiene lugar según leyes desconocidas en las lejanas extensiones del espacio, todas nuestras especulaciones son vanas; semejante cautela está sugerida por esos misteriosos mensajeros, los rayos cósmicos, que llegan hasta nosotros cargados de energía procedentes de orígenes astronómicos no descubiertos y que significan, cada uno de ellos, una minúscula contradicción con la ley de los promedios. En décadas anteriores[7] los hombres se recrearon en el pensamiento de que los procesos orgánicos podrían invertir el curso probable; esa especulación es errónea, pero nadie parece necesitar consuelo hoy.

2. Consideremos la segunda cuestión: ¿por qué se ve obligada la estadística a tratar de probabilidades? Ya se ha dado contestación a tal pregunta desde el punto de vista metodológico; habría que convertir en fijos los observables latentes. Mas ¿por qué no tomar promedios de los movimientos reales de las moléculas, como sugieren tan directamente el espíritu de la dinámica y el ejemplo del cometa? La respuesta es sencilla: no podríamos realizar ese trabajo. De ahí que sea imposible decir si las probabilidades son o no esenciales para explicar la termodinámica. Esto hace pensar que acaso los conjuntos de GIBBS y los estados microscópicos sean pantallas para encubrir la ignorancia: puesto que es imposible determinar las posiciones e impulsos de todas las moléculas en un instante, cualquiera que éste sea, se hace preciso suponer alguna distribución inicial (tal es la finalidad del conjunto canónico) que dé origen el comportamiento termodinámico observado. Nada impide, sin embargo, plantear la cuestión refiriéndola a la situación inicial de todas las moléculas en un sentido fundamental; pues la atribución de posiciones e impulsos a puntos materiales tan pesados como las moléculas no viola gravemente las leyes de la naturaleza, siendo la dificultad solamente de tipo práctico, y a uno le gustaría, desde luego, adscribir el éxito del conjunto canónico y de la teoría de los estados microscópicos a la circunstancia de que, de hecho, las reuniones moleculares nunca asumen complexiones contradictorias con los postulados probabilitarios, o, por lo menos, con la circunstancia, más moderada, de que todas las configuraciones posibles conducen en último término a los estados descritos por los conjuntos canónicos.

Mas sucede que esta última suposición no es completamente cierta. Y no lo es porque las leyes de la mecánica permiten estados que no abo-

[7] Véase G. HIRTH: *Die Ektropie der Keimsysteme*, 1900.

can nunca a la clase de equilibrio contemplada en la mecánica estadística. Son éstos los movimientos periódicos: una vibración concertada de todas las moléculas contenidas en un recipiente, entre la tapa y el fondo, es un ejemplo de ello. Esto es improbable, desde luego, pero una vez comprobado violará las suposiciones estadísticas que subyacen bajo la termodinámica.

Pero, en otro sentido, la hipótesis de que todas las configuraciones terminan por conducir a las condiciones descritas por los conjuntos canónicos es verdadera; pues cabe la posibilidad de movimientos excepcionales, pero éstos son dinámicamente tan inestables que la más ligera perturbación los destruiría: no es necesario, en absoluto, tenerlos en cuenta en un sentido estadístico, y, de hecho, puede demostrarse que forman un conjunto de medida cero dentro del conjunto de todos los movimientos posibles. Esto es satisfactorio y crea confianza en los postulados de la estadística. No se ha conseguido su completa reducción a bases mecánicas (hipótesis ergódica), de modo que no podemos decir que, si conociésemos las posiciones y velocidades exactas de todas las moléculas de un gas en todos los momentos, podrían extraerse las leyes de la termodinámica sin apelar a factores no dinámicos. La situación tal vez no sea exactamente igual a la del cometa, cuyo movimiento podría haberse predecido de conocerse su estado inicial.

Sobre este crucial problema pueden proyectar nueva luz ciertas investigaciones actuales (BIRKHOFF, VON NEUMANN, KOOPMANN, WIENER). Pero, entretanto, el filósofo de la ciencia queda abandonado con un problema sin resolver ante este desafío que las probabilidades de la mecánica estadística ofrecen a los intentos de reducción definitiva; pues si estas probabilidades son primarias, si son el último recurso del científico, deben formar parte, en algún sentido, de la realidad física.

Desde otro punto de vista, el problema ha perdido su carácter de urgencia; ello se debe al desarrollo alcanzado por otra disciplina, la mecánica cuántica, en el que, según se sabe, las cualidades son irreductibles. En consecuencia, cualquiera que sea el resultado de las investigaciones en el campo de la mecánica estadística, es preciso incorporar las probabilidades a la estructura de la realidad.

Finalmente, se hace preciso decir unas palabras acerca de la utilidad de la estadística, para evitar que surja la impresión de que los físicos que trabajan en este campo se preocupan solamente por académicas cuestiones de coherencia y significado: se está trabajando mucho actualmente en problemas marcadamente prácticos, y el tema se ha convertido en un valioso auxiliar de la termodinámica. Mientras que esta ciencia descansa en la medición de sus variables, la mecánica estadística puede calcular sus análogos a partir de las propiedades moleculares y predecir luego el comportamiento termodinámico de una sustancia, antes incluso de la experimentación. Esta utilidad práctica de la mecánica estadística ha hecho hoy en día del físico teórico un miembro deseado de los grupos dedicados a la investigación química.

RESUMEN

En este capítulo, un tanto técnico, hemos incorporado la mecánica estadística a la metodología desarrollada en el presente libro. Prestamos bastante atención a las cuestiones de qué se entiende por la "reducción" de la termodinámica a la mecánica estadística y de qué manera ésta es capaz de "explicar" las leyes de aquélla.

Exponemos el clásico enfoque de GIBBS de esta ciencia y lo hacemos contrastar brevemente con el de DARWIN y FOWLER. Un problema de gran importancia filosófica es el de si la probabilidad ingresa en la física por razón de mera ignorancia (o, tal vez, conveniencia por parte del investigador) o si se halla indeleblemente estampada en la ciencia en virtud de los axiomas de la mecánica estadística; y hemos hecho ver que en la actualidad cabe sostener tanto uno como el otro de estos puntos de vista.

Finalmente, hacemos algunas observaciones en torno a la perspectiva de la "muerte térmica" del universo y su inminencia.

BIBLIOGRAFIA

EDDINGTON, A. S.: *The Nature of the Physical World,* The Macmillan Company Nueva York, 1929 [vers. cast. cit.].

FOWLER, R. H.: *Statistical Mechanics,* Cambridge University Press, Londres, 1929.

GIBBS, J. W.: *Statistical Mechanics,* Charles Scribner's Sons, Nueva York, 1902.

LINDSAY, R. B., y H. MARGENAU: *Foundations of Physics,* John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1936.

MAYER, J., y M. G. MAYER: *Statistical Mechanics,* John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1940.

SCHRÖDINGER, E.: *Statistical Thermodynamics,* Cambridge University Press, Londres, 1946.

CAPITULO XV

UN PRIMER ESBOZO DE LA REALIDAD

15.1. Las realidades no físicas

Hemos recorrido un largo trecho desde nuestra tarea inicial, la búsqueda de la realidad física. El camino parecía claro y despejado al principio; para evitar todas las preconcepciones, en particular para huir de las trampas hábilmente tendidas por los ontólogos a lo largo del terreno que teníamos que recorrer, decidimos que fuese nuestro guía el método científico; mas ahora parece como si el método científico nos hubiera llevado muy lejos de la principal ruta, a través de todas las callejuelas de la física, y hubiera conseguido admirablemente obscurecer incluso el inicial vislumbre que tuvimos de nuestro objetivo.

Tal es el precio que tenemos que pagar por la decisión inicial. Podríamos haber volado hasta nuestro destino, tomando de los parques de la ontología uno de los globos que tan abundantemente allí se encuentran, y, dado un viento favorable, hubiéramos podido llegar hasta él rápidamente; pero no habríamos sabido con certeza la situación exacta de la realidad con respecto a otras partes de la experiencia humana, ni el territorio que la rodea; ni tampoco podríamos estar completamente seguros de que nuestro lugar de aterrizaje era el que buscábamos.

El tratamiento epistemológico que hemos emprendido no carece de peculiares riesgos propios. Siendo el lento avance de una partida terrestre, puede perderse en algún ameno valle muy alejado de la realidad; o los exploradores, después de largas y agotadoras búsquedas, pueden regresar e informar que su presunto objetivo no existe, que es un espejismo sólo visible desde la parte alta de la atmósfera. Esta última posibilidad es, en realidad, el mayor peligro a que se expone el epistemólogo: siente constantemente la tentación de rechazar todo, debido a la dificultad de asentar debidamente cualquier parte de la realidad; cosa que, según Poincaré, es el otro camino fácil de salida: *"Douter de tout et tout croire, ce sont deux solutions également faciles."*

No tenemos la intención de poner a salvo lo que se pueda rescatar de nuestros primeros frustrados intentos de averiguar cuál sea la realidad *física*, sino que respetamos la honrada conclusión de muchos hombres de ciencia actuales que declaran que el método científico no puede llegar a ponerse en contacto con la realidad última. Se refieren a la clase de realidad que gravita sobre el horizonte del ontólogo; en efecto, dado

que tal realidad parece ser diferente de la suya propia y puesto que los filósofos han preconizado a menudo el uso de tal término para sus especiales finalidades, los científicos se han tornado *indebidamente* reticentes en relación con este problema. Sin embargo, para ellos dicho término significa algo completamente claro y definido; pues, ¿quién negaría que ha de atribuirse realidad física a las estrellas, las piedras y los átomos?

La causa de muchos fiascos epistemológicos ha sido la tendencia, largo tiempo arraigada, de implantar en la realidad una noción de lo absolutamente permanente: es la realidad inmutable, algo ineludiblemente estático, de lo que tan fácilmente caen presa las mentes ávidas. La realidad estática es el resultado de muchas investigaciones que permanecen totalmente dentro de los límites de la lógica y aplican las reglas lógicas a objetos preformados de la experiencia. La pretensión de autosuficiencia en cuanto a asentar la realidad así construida por la lógica es como la jactancia de ARQUÍMEDES respecto a la importancia del principio de estática que acababa de descubrir, la ley de la palanca: "Dadme un punto de apoyo, y moveré el universo." La lógica parece decir: "Dadme los objetos de la experiencia, y definiré la realidad." Ambas pretensiones tienen razón; pero la dificultad de Arquímedes para encontrar un fulcro es muy grave; e igualmente lo es la cuestión de expresar *qué* son los objetos de la experiencia: ¿incluyen, por ejemplo, las imperceptibles entidades de las teorías actuales?

Sucede que la ciencia define una clase dinámica de realidad, una clase de realidad que crece y se modifica a medida que lo hace nuestro conocimiento. No admitiremos la derrota ya desde el principio porque la filosofía tradicional encuentre esto sorprendente y desagradable; antes bien, tomaremos el éxito de la ciencia como una prueba vigorosa en su favor.

Los conceptos mismos de la ciencia están sujetos a los requisitos de permanencia hasta el máximo que les es posible soportar, ya que, de acuerdo con el análisis expuesto en el capítulo V, la permanencia es una de las resoluciones metafísicas con que la ciencia se castiga a sí misma voluntariamente. (Mas posee suficiente sabiduría para permanecer viva bajo el castigo.) En este sentido, pues, todo lo que define como real lleva la impronta de lo duradero, del principio del ser. De aquí que, como veremos, la realidad, si bien violando las irrazonables exigencias de persistencia eterna, incorpora el máximo de lo que es verdaderamente permanente en la experiencia.

En este punto debe hacerse mención de otro extendido equívoco: la creencia de que la realidad es la *causa* de nuestra experiencia. Es difícil de comprender qué significa concretamente esto, pero, debido a la ambigüedad de la palabra "causa", es evidente que quienes sostienen esa postura se muestran reacios a prestar oídos a una formulación de la realidad que no explique la totalidad de la experiencia humana, y se sentirán decepcionados ante lo que tenemos que decir. Para nosotros, la realidad no es la causa, sino una parte especificable de la experiencia. Un estudio con-

cienzudo y equilibrado de la ciencia exige a sus cultivadores una importante concesión: deben aceptar el hecho de que la ciencia no resuelve el misterio último de la experiencia, si es que existe tal misterio, cosa que algunos dudan; da por sentada, pues, la experiencia y no trata de responder a la pregunta de Heidegger: "Was nichtet das Nichts?"

Aquí parecemos estar admitiendo la existencia de *otras clases de realidad* distintas de la física. Sin embargo, no es aconsejable pasar de largo sobre el prejuicio a que invita una admisión tan carente de matización: sólo pretendemos reconocer el evidente hecho de que existen clases de *experiencia* distintas de las encuadradas normalmente en el conocimiento científico; cierto que todavía no se las ha reunido en un módulo organizado comparable a la estructura de la realidad física, y podría perdonársele al científico que propusiera denegarles actualmente el término de *realidad,* pero cuando queden así organizadas tal vez presenten los caracteres de la ciencia, o tal vez no: podremos utilizar para su tratamiento todo el arsenal del ingenio humano, y mal puede ser de nuestra incumbencia prescribir un único método para todas las investigaciones. Lo que al científico le cabe hacer, sin embargo, en asociación con estudiosos serios de otros campos que empleen enfoques diferentes al suyo, es examinar más asiduamente la aplicabilidad de sus propios métodos a problemas no científicos [1]. Y lejos de aventurar un pronóstico sobre el resultado de tales esfuerzos, este libro se limita a señalar el significado positivo de la realidad *física* en el momento actual, ya consista o no en un concepto limitado; tarea que consideramos como un necesario primer paso hacia aquel otro objetivo, más amplio.

El examen de la ciencia física que hemos efectuado hasta ahora, incompleto porque excluye la teoría de los *quanta,* hace posible, sin embargo, un enunciado preliminar de la respuesta a nuestro problema. Es conveniente, por lo tanto, que concretemos los términos al llegar a este punto de nuestro trabajo; en su relación con la precedente revisión de cuestiones, sin embargo, acaso parezca la respuesta innecesariamente compleja, y surja con fuerza la sospecha de que la presente exposición ha seguido un camino tortuoso con el fin de dar sensación de erudición. En particular, la introducción de reglas de correspondencia en el esquema epistemológico, tendente a reunir las impresiones sensoriales y las construcciones interpretativas que constituyen su contrapartida, puede parecer artificial y confusa, y distinciones tan sutiles como la practicada entre observables latentes y poseídos se verán sujetos, sin duda, a desaprobación en virtud de su inutilidad. Más adelante hemos de ver clara su importancia; por el momento esperamos demostrar que la respuesta que se ha de dar no es inconsecuente con estos refinamientos, o, si el lector lo prefiere, con estas artificiosidades.

[1] Puede encontrarse un esbozo de la aplicación del método científico a la ética en dos artículos del autor: *Am. Jour. of Physics,* 15:218 (1947), y *Scientific Monthly,* 69:290 (1949). Véase también *Conflicts of Power in Modern Culture,* editado por L. Bryson, L. Finkelstein y R. M. MacIver (Conferencia sobre Ciencia, Filosofía y Religión), Nueva York, 1947, pág. 13.

15.2. Definimos la realidad

Hemos clasificado los elementos de la experiencia significativos para la ciencia en: 1) datos sensibles inmediatos o impresiones, a cuya totalidad hemos denominado Naturaleza; 2) reglas de correspondencia, y 3) construcciones interpretativas. Para ser válidas, o sea, para ser verifactos, estas últimas tienen que pasar satisfactoriamente dos complicadas pruebas: 1) aisladamente y en combinación, deben someterse a ciertos requisitos metafísicos; 2) han de obedecer las rigurosas exigencias de la verificación empírica.

Tenemos una respuesta sencilla (si bien no satisfactoria) a la cuestión de la realidad si reservamos la cualidad "real" para todas las partes de la Naturaleza. Ya hemos expuesto las deficiencias de semejante concepción: en primer lugar, abarcaría mucho más de lo que podríamos pretender razonablemente que es el dominio de la realidad física, ya que incluye los rudimentos de la estética, la ética y la religión; y, además, entre los elementos que es preciso rotular superficialmente con la denominación de físicos, la Naturaleza nos presenta algunos (alucinaciones, espejismos, etc.) que rechazamos por razones metodológicas. Pero si esto indica la necesidad de *seleccionar* de la Naturaleza cierta parte de su contenido, un examen más atento muestra que es preciso bloquear asimismo ese camino; pues es evidente que hay que admitir en la clase de lo real muchas cosas que no se perciben inmediatamente.

A estas dificultades se unen otras de un tipo más formal, pero igualmente desastrosas. Si los datos sensibles fuesen solamente elementos obtenidos de la realidad, su dominio se hallaría mal definido: como ya hemos puesto de relieve, es difícil establecer una frontera clara de lo sensorial, ya que la transición desde los datos hasta las construcciones interpretativas es gradual; peor aún, la experiencia sensible es de corta duración, y sería inadecuado adscribir realidad solamente a momentáneos brotes de percepción: no se ha propuesto jamás ninguna doctrina seria de *esse est percipi* dentro de un contexto tan limitado. Lo que le queda al defensor de lo real entendido como sensorial es la posibilidad de incluir cierta selección de todas las percepciones sensibles pasadas, presentes y futuras de todas las personas y, presumiblemente, de todos los seres sensibles, pero esta posibilidad es mínimamente atractiva para quienquiera que profese el debido respeto a la claridad de expresión.

No podemos, sin embargo, prescindir de la Naturaleza, pues, ciertamente, la impresión de que una piedra cae debe ser juzgada real por cualquiera que la perciba, y los experimentos del científico, sus lecturas de los instrumentos de medida, sus operaciones, todo ello reclama su título de realidad. Lo que resulta evidente de tales consideraciones es que el campo de los datos de los sentidos, si bien coincide parcialmente con el terreno real, lo hace así más o menos por afirmación gratuita: es incapaz de demostrar que es pertinente en virtud de su propia procedencia

Por esta razón, y por otras ya expuestas, nos vemos impelidos más allá de los confines de la Naturaleza en nuestra búsqueda de la realidad física.

El que las reglas de correspondencia formen parte de ella o no podrá advertirse fácilmente por referencia al lenguaje ordinario, que, después de todo, tiene justos derechos para dirimir la cuestión; pues igualmente nos interesa lo que de hecho signifique la realidad en un discurso científico lúcido y lo que debería significar en los casos en que el lenguaje sea ambiguo. Las reglas de correspondencia, en la medida en que se las reconoce, no se admiten como parte de la realidad: más bien se las toma como "instrumentos mentales", como hábitos de pensamiento, o, en los casos en que son lo suficientemente alambicadas como para haber suscitado especial atención, como definiciones operacionales. Como luego veremos, son factores para establecer la realidad, pero no hay que considerarlas reales en sí mismas.

El problema parece centrarse entonces en las construcciones interpretativas. Si los objetos externos son construcciones de esta índole tienen que poseer la clave de la realidad: el árbol es real porque es el término racional a que abocan ciertas reglas de correspondencia que tienen su origen en impresiones sensibles y porque satisface las exigencias de coherencia que impone el sentido común, y los átomos son reales porque son los términos racionales de otras reglas de correspondencia, menos evidentes, que tienen su origen en impresiones sensibles más alambicadas y porque como construcciones interpretativas satisfacen las exigencias formuladas por los principios metafísicos de la ciencia (en los que la práctica y un escrupuloso cuidado han transformado las inarticuladas máximas del sentido común). Así, pues, la realidad se confiere conjuntamente por el proceso de encajar nuevas partes en una estructura ya existente de concepciones ordenadas y por el proceso de validación empírica. Las construcciones válidas, los verifactos (por decirlo en términos más breves), son los elementos de la realidad: las construcciones no son válidas porque se refieran a algo real; por el contrario, denotan algo real porque han resultado ser válidas. De ahí la descollante importancia de la epistemología.

Naturalmente, no hay nada en el acto de montar una construcción interpretativa que convierta *per se* a su producto en un candidato a lo real más prometedor: quien quiera creer que *encuentra* conceptos, entidades abstractas u objetos externos dentro del mundo que le es dado puede todavía aceptar nuestro criterio de realidad. Solamente debe parecerle un poco extraño que algunas de las cosas que él "encuentra" sean reales, mientras que otras no lo sean.

Si se reflexiona, este criterio puede suscitar algunas cuestiones embarazosas, al menos a primera vista. Para certificar que una construcción interpretativa denote algo real debe haber a mano un contexto racional en el que se integre o pueda integrarse; dicho de otro modo, debe disponerse de una teoría confirmada, ya que en otro caso no podría uno

estar seguro de que se satisfagan los requisitos metafísicos. Desde luego, el término *teoría* debe tomarse en un sentido conveniente, incluyendo las asociaciones y expectativas ciertas, aunque sean inconscientes, que formamos acerca de los simples objetos de nuestras vidas cotidianas; pero no debe extenderse hasta las inciertas conjeturas llamadas adivinaciones e hipótesis. En este punto surge una de las embarazosas cuestiones aludidas: ¿no ocurrirá que *no* son reales las entidades que figuran en una hipótesis y que se *tornan* reales cuando ésta queda elevada, tras haber sido sometida suficientemente a prueba, al rango de teoría?

A menos que se reflexione con cierto detenimiento sobre esta cuestión, parece ofrecer una alternativa clara, que requeriría una respuesta afirmativa o negativa sin más matices, y, por consiguiente, parece que fuerza a que se separen aquí los distintos caminos a tomar. Es quizá natural para el científico adoptar una postura afirmativa, sostener que las entidades empiezan verdaderamente su vida, comienzan a ser reales, cuando se las descubre: podría argüir que otras concepciones implican cierto misticismo y prescinden de todo ingrediente sólido de la realidad que la ciencia ofrece. No cabe duda, diría, de que puede tolerar la diferencia entre realidad y *conocimiento* de la realidad como una sutileza admisible, porque, después de todo, es distinto que alguien conciba un verifacto y que yo tome conciencia de él; pero sacar la realidad de la experiencia, de la experiencia de cualquiera, significa privarla de sustancia. La única forma posible —podría continuar— por la que el científico que quiere que la realidad anteceda a su descubrimiento puede salvar su postura como persona razonable es seguir a BERKELEY, suponer la presencia adicional de una experiencia divina con el fin de estabilizar su desconectada realidad.

Hay mucho de verdad en esta argumentación.

Por otra parte, la mayoría de los científicos y filósofos rehuyen estas conclusiones: tienen la sensación de que la realidad no puede nacer con el conocimiento del hombre, de que el descubrimiento y la confirmación son completamente incidentales respecto de su existencia, cuya esencia reside por encima de las vicisitudes de la experiencia, en un impresionante esplendor acaso platónico.

También en esta concepción hay buena parte de verdad.

La cuestión que estamos tratando de resolver no es tan sencilla como parece, y tiene cierta semejanza con la famosa pregunta: ¿ha dejado usted de pegar a su mujer? Veamos lo que significa en un caso concreto. En 1932 CHADWICK descubrió el neutrón[2]; después de esa fecha, la respuesta de un físico a la pregunta de si existen los neutrones habría sido afirmativa; pero antes de 1932 la respuesta no habría sido unánime, pues el descubrimiento estuvo precedido por un nebuloso período de unos

[2] J. CHADWICK: *Proc. Roy. Soc.*, A136:692 (1932). Para un examen de este descubrimiento y de otras cuestiones relacionadas con la física nuclear experimental, véase J. D. STRANATHAN: *The Particles of Modern Physics*, Filadelfia, The Blakiston Company, 1942.

doce años, durante el cual la existencia de los neutrones parecía posible, pero no se la podía confirmar, pese a los numerosos intentos experimentales. (La *hipótesis* de la existencia del neutrón, considerado como unión íntima de un protón y un electrón —cosa que más tarde ha resultado *no* ser—, fue propuesta originariamente por RUTHERFORD en 1920.)

Así, pues, entre 1920 y 1932 la gente habría considerado posible la realidad de los neutrones, tal vez probable, pero insegura.

Antes de 1920 la cuestión habría provocado dos clases de respuestas. El científico que tuviese por norma atenerse a los hechos comprobados habría dicho: "No"; un cauteloso milquetoastiano: "No sé"; pero este último habría dado la misma contestación a una pregunta acerca de la existencia de unicornios.

Y llegamos ahora a una cuestión, mucho más decisiva, que es preciso contestar a la luz de lo que hoy sabemos: ¿Existían los neutrones (cosa que debe entenderse como completamente sinónima de "eran reales") antes de 1932? Con mucho, la mayoría de los científicos contestarían afirmativamente, y puede considerarse que ésta sería también la contestación aunque se cambiara la fecha sustituyéndola por la de 1920.

Pero, evidentemente, la idea fue elaborada, objeto de construcción, en 1920, y validada en 1932. ¿Cómo puede ser real una construcción interpretativa antes de construírsela? Esta aparente paradoja tiene una solución perfectamente aceptable siempre que no olvidemos los resultados de nuestro análisis metodológico. Pues si las construcciones interpretativas, para ser válidas, tuviesen que satisfacer solamente los requisitos sensoriales o fácticos, la paradoja aplastaría todos los argumentos; observemos, sin embargo, la importancia de los principios metafísicos, uno de los cuales exige la permanencia de tales construcciones, y la unicidad y permanencia de las reglas de correspondencia que las relacionen con la experiencia sensible presente, futura y *pasada.* Así, el acto mismo que establece el verifacto implica la uniformidad de su actuación a lo largo del tiempo, si bien, por lo que sabemos, la implica erróneamente en la mayoría de los casos, pues la mayoría de las construcciones interpretativas quedan abrogadas o modificadas tarde o temprano; pero la aceptación de una construcción de esta índole como válida, aun temporalmente, debe, sin embargo, por virtud de su concatenación metafísica, traer consigo que se le impute permanencia y, por consiguiente, que se proyecte su realidad en el pasado. Una vez admitido esto, ya no resulta paradójico decir: *Una vez validada una construcción interpretativa debe decirse que ha sido real antes de ser formada.*

Sin embargo, ello no sitúa a estas construcciones totalmente por encima de las contingencias de la experiencia: en cierto sentido, el neutrón de RUTHERFORD nunca ha sido real, pues algunas de las propiedades que le atribuía no se han visto confirmadas, y, de la misma manera, un porfiador lógico podría negar la realidad del neutrón tal como se la concibe actualmente, pues es casi seguro que algunas de las propiedades que se le atribuyen se verán sometidas a revisión en el futuro. ¿Hemos de decir,

entonces, que el neutrón como tal es real —pues podría razonablemente mantenerse la creencia en que continuará funcionando como parte de la teoría física—, pero que no lo son sus propiedades? Como ya hemos visto, las propiedades son también construcciones interpretativas; y en este punto, antes que ir trazando unas distinciones cada vez más complicadas, estoy perfectamente dispuesto a admitir que la realidad cambia a medida que se producen descubrimientos: no puedo ver nada básicamente erróneo en un mundo que sufra modificaciones juntamente con el fluir de la experiencia. Desde luego, el contexto metafísico nos fuerza siempre a considerar el pasado como incesantemente visitado por las construcciones interpretativas que ahora tengamos por reales, mas, para ser honrados con nosotros mismos, no podemos imponer rígidamente al futuro esa estructura estática. Evidentemente, esto asesta a la realidad eterna, el εἶναι en mayestático reposo, un golpe demoledor.

Es fácil sucumbir a la tentación de distinguir al principio entre la permanencia de las entidades físicas y la de las teorías acerca de ellas diciendo, por ejemplo, que las entidades mismas no están afectadas por las vicisitudes de las teorías. (Semejante aseveración equivale a admitir el fracaso del enfoque epistemológico de la realidad.) Para defender esta distinción, los autores hacen a veces hincapié en la relativa independencia existente entre la teoría y las cualidades más generales de todos los elementos constitutivos del mundo físico; por ejemplo, sostendrían que el neutrón como tal, si es real, nunca será abandonado como parte de la realidad aunque la masa que admitimos que tiene, su estructura interna o su momento magnético puedan experimentar cambios al cambiar las teorías: pensarían, pues, que el neutrón es algo permanente, mientras que no conocemos bien sus propiedades, que estarían reguladas por la teoría del momento. Lo malo de tal intento radica en su fracaso histórico. Ocurre frecuentemente que entidades introducidas por la ciencia quedan desautorizadas *in toto,* y durante su reinado no se las puede distinguir de elementos reales en un sentido más duradero.

En nuestra opinión, es imposible escindir completamente las entidades y las teorías, y la admisión de la vida de los entes reales, independientemente de la vida de las teorías que los mantienen como reales, es un error: la diferencia procede solamente de que los principios metodológicos, en su papel de estabilizadores de la experiencia, nos hacen natural postular y creer en la permanencia siempre que haya quedado asentada la realidad. Esta permanencia, aunque putativa, es lo más que tenemos, y la ciencia muestra que es suficientemente buena para todos los fines que se propone (yo la considero muy superior a la permanencia estancada y deploro la actitud de los científicos que buscan esta última).

Los románticos y los idealistas rehuyen frecuentemente la aparentemente heterodoxa tesis de un mundo real en progreso, una realidad sujeta a cambios provocados por los descubrimientos. Y lo consiguen sustituyendo las certidumbres por una creencia: la creencia en una convergencia de todos los verifactos en evolución hacia un límite de verifactos

definitivos, límite que identifican con una especie de realidad última. Es cierto que la mayoría de los científicos activos profesan esta creencia; pero difícilmente se jugarían el todo por el todo apostando por tal verdad, que es indemostrable. El hecho es que, como ya hemos dicho, la ciencia es posible sin semejante suposición. Y ahora advertimos, además, la posibilidad de definir sin ella la realidad física.

Sin embargo, no hay necesidad de dogmatismos en este punto: es perfectamente lícito introducir dos clases de realidad: a una podríamos llamarla la realidad *física,* siendo posible identificarla con la que hemos descrito, y podríamos denominar a la otra realidad *última,* que es del tipo de pura expectativa, definible solamente en sentido retrospectivo cuando (y sólo si) la ciencia ha alcanzado un grado suficiente de convergencia. La realidad última no es en sí misma una construcción interpretativa científica; desempeña, sin embargo, un importante papel de estímulo para la investigación, pues el científico es también un hombre completo y vive por ideales; pero, sea cualquiera el atractivo psicológico de tales *ultima eventura,* el presente libro no se refiere a ellas.

Hemos utilizado una terminología muy vaga en la última sección: decíamos allí que los verifactos "se referían a" y "denotaban" algo real. Podemos admitir ahora francamente que hemos hecho tal cosa para evitar que el lector se escandalizase; pero tras la explicación precedente nos apresuramos a corregir ese uso, con el fin de no dar nacimiento a ninguna espectral realidad más allá de las construcciones interpretativas válidas. Estos verifactos, como parte de la experiencia, son realidad, pero no son toda la realidad.

15.3. La realidad de los datos; los otros yoes

Anteriormente, en este mismo capítulo, hemos observado una importante vinculación entre la percepción inmediata, nuestra Naturaleza y la realidad; solamente ha seguido siendo problemática la cuestión de cómo podía practicarse una selección de datos reales, ya que la Naturaleza no proporcionaba ninguna ayuda. Tal selección puede hacerse y es posible asentar la pertinencia para con la realidad apelando a los verifactos. Yo veo "realmente" un árbol si el objeto transmitido a través de esta visión está conforme a los requisitos de las construcciones interpretativas válidas: la percepción de un espejismo es ilusoria, irreal, porque no transmite ninguna entidad confirmable. Este es el sentido primario en que el término *real* se aplica a los datos.

Existen varios otros, que tienen la característica de cualificar impresiones sensoriales que hayan tenido lugar en el pasado. Uno puede preguntar si una persona sufrió una verdadera alucinación en cierto momento, si Juana de Arco oía realmente voces o si Cook vio realmente el Polo Norte. La primera de estas tres cuestiones se nos manifiesta como enteramente distinta de las otras, y particularmente de la última, porque

adscribe realidad a un acto de percepción que era en sí mismo irreal en el primitivo sentido. Sin embargo, las tres tienen en común lo siguiente: interrogan acerca de *sucesos* sin tomar directamente en consideración su significado para la realidad física; son ejemplos del uso de la palabra *realidad* por parte del historiador.

Pero este uso sigue estando conforme con nuestra definición. Las impresiones sensoriales pasadas del tipo de que nos estamos ocupando se convierten en sucesos que constituyen un curso temporal conjeturado de un universo objetivo; existen, pues, construcciones interpretativas que necesitan ser verificadas como tales. Los métodos de confirmación son, creemos, idénticos a los esbozados en el presente libro, aunque lo que se subraya de los diferentes requisitos parece ser distinto; el proceso de verificación empírica tiene, sin embargo, forma de circuito, con un suceso sugiriendo otro e impulsando finalmente la investigación al terreno de lo inmediato, cosa que en el presente caso puede muy bien ser un texto antiguo o una frase de un documento. No tenemos el propósito, ni es de la competencia del autor, de examinar extensamente el significado de la realidad histórica. Pero puede afirmarse que cuando los hechos históricos, los sucesos pasados, se miran como proposiciones a confirmar, la historia establecida se convierte en una sucesión real de acaecimientos objetivos y comparte muchos de los atributos de la realidad física.

Tras esta digresión volvemos a resumir el *status* de los datos. Es preciso distinguir dos acepciones del término *real* aplicado a las impresiones sensibles, acepciones que vamos a admitir: la primera atribuye a las percepciones la cualidad de estar relacionadas con el mundo real, de carecer de doblez, no ser ilusorias (cualidad que surge de las relaciones entre la impresión particular y los verifactos y otras impresiones); la segunda acepción o significado se refiere a los actos sensoriales como sucesos, y afirma que han sucedido realmente. Aquí, el acto mismo pierde la vividez y coerción que lo inmediato posee en la experiencia propia, convirtiéndose en una *construcción interpretativa* que necesita ser validada.

La situación es algo distinta con respecto a los datos sensibles que yo mismo recuerde: se autentican a sí mismos como reales en el segundo sentido y requieren validación solamente en el primero, por tanto. La diferencia, sin embargo, es gradual: las impresiones sensoriales oscuramente recordadas participan de la naturaleza de las construcciones interpretativas y exigen que se las verifique de ambas maneras; pues ya hemos visto que, a lo largo de la extensión de la memoria, lo inmediato asume progresivamente el carácter de lo racional.

En lo sucesivo vamos a confinar principalmente la atención a la realidad de los datos sensibles en su primer significado, su calidad de no ilusorios. El otro, la incidencia efectiva, se da siempre por supuesto por el científico cuando utiliza datos en sus procedimientos empíricos.

Somos culpables de haber hablado acerca de las impresiones sensi-

bles pasadas ajenas sin indicar qué significa la experiencia ajena. La epistemología que ocupa los capítulos precedentes admite solamente la "experiencia", lo cual significa —es de presumir— mi propia experiencia, en primera persona; la realidad se construiría a partir de los elementos de esa experiencia y continuaría formando parte de ella cuando esté plenamente formada. ¿No nos inmoviliza eso en el solipsismo? Decir que los objetos que nos rodean son reales es reclamar para ellos el carácter de verifactos; es, a la vez, la máxima medida de efectividad, de autenticidad que puede serles atribuida. Este protocolo de la realidad, así entendida, es el compromiso epistemológico último. Otras personas existen para mí precisamente en el mismo sentido exhaustivo y, sin embargo, nada misterioso: cuando se dice de ellas que son (físicamente) reales se las presenta en este carácter como verifactos dentro del ámbito de conocimiento de uno mismo; y sus experiencias, sus "yoes" están dados y confirmados como todas las demás certidumbres cognoscitivas. De esta forma, la experiencia de los demás, con sus manifestaciones como seres sentientes elevadas ahora a la categoría de realidad, se convierte en una parte importante de mi propia experiencia.

15.4. El mundo real

De acuerdo con el anterior análisis, el mundo real comprende todas las construcciones interpretativas válidas y la parte de la Naturaleza que se halla (o se hallaba, en el amplio sentido que incluye la realidad histórica) en correlación epistémica con ellas; tales son los elementos que tienen (o tuvieron) existencia física. Haremos un breve examen de ellos, que valdrá para cerrar apropiadamente este capítulo.

Las cosas que reconocemos en nuestra vida diaria, tanto animadas como inanimadas, pertenecen claramente al mundo real, debido a que hemos formado nuestros criterios con especial referencia a ellas. En su ulterior elaboración, estos criterios continúan especificando lo que es real en el invisible universo de la ciencia; en él, sin embargo, debe abandonarse a veces la guía del sentido común en favor del veredicto de unos principios abstractos, aunque ese veredicto pueda parecer extraño.

Por lo que se refiere a la realidad de las entidades postuladas dentro del campo molecular y atómico, no puede surgir ninguna cuestión, pese a su indirecta accesibilidad a la percepción. Pero resulta igualmente claro que no necesitan poseer las cualidades en que la experiencia macroscópica hace pensar; de ahí que no sea paradójico concluir que los átomos no tienen color, los electrones ninguna posición definida, etc. Las mismas consideraciones permiten atribuir cualidades no intuibles a objetos en general sin destruir su realidad: el universo físico, por ejemplo, tal vez sea concebible solamente en cuatro dimensiones, y puede, sin embargo, existir como una entidad física aceptable y real.

Pero, ¿qué decir acerca de las propiedades que estos objetos físicos

conllevan, propiedades que la medición revela que varían de un instante a otro? Si se las reconoce como construcciones interpretativas válidas —y creemos que esta premisa ha quedado bien asentada en el capítulo anterior para todos los observables físicos—, no se les puede retirar la realidad. En esta conclusión parece haber cierta inconsecuencia, ya que las magnitudes no son permanentes, con lo que se diría que violan uno de los principios metafísicos que hemos fijado; pero tal apariencia se desvanece a poco que se reflexione sobre ello: como observables, las magnitudes se asignan a los sistemas con relativa invariabilidad, si bien cambian de *valor*. Así, la posición de un cuerpo en movimiento puede cambiar continuamente sin obligarnos a negar que la construcción interpretativa "posición" se manifiesta permanentemente, en todo instante.

La cuestión siguiente hace referencia a la realidad de los cambiantes *valores* numéricos de los observables físicos. Un trozo de materia es real; y también admitimos como real su temperatura, por ser un observable permanente; pues bien, digamos que la temperatura es en este momento de 10° C (50° F): ¿son reales los 10°? Estamos aquí apremiando al científico a que se comprometa a un juicio que rara vez se le invita a efectuar. Teniendo en cuenta que el valor 10° C puede ser asentado con certeza y no viola ninguna máxima de la realidad, excepto la permanencia [3], estaría dispuesto a relajar las exigencias de ese principio y admitir el valor como un elemento momentáneo de la realidad. Tal sería, con toda probabilidad, la decisión del físico, expresada en una proposición como la siguiente: el mundo real contiene un bloque de metal que se halla ahora a una temperatura de 10° C. Pero si alguien quisiese negar a este particular valor el rango de realidad, difícilmente podría el científico oponer una objeción fuerte: existen casos, después de todo, en los que no es necesario dar un veredicto claro, en los que el problema de la realidad carece de interés.

En el capítulo VII hemos manifestado una acusada preferencia por la interpretación del espacio como entidad *relacional;* y ahora debe ponerse de relieve que esta admisión no refleja ningún prejuicio sobre la *realidad* del espacio. Hay construcciones espaciales, tales como punto, línea y superficie, que subsisten en múltiples y estables correspondencias con datos de la experiencia inmediata, convirtiendo los datos en partes integrantes de nuestra experiencia total y haciéndolos así comprensibles; por esa razón son verifactos y tienen igual pretensión de realidad que los objetos cosificados que encontramos. A partir de puntos, líneas y superficies puede construirse el espacio, y esta nueva entidad, aunque

[3] Debe recordarse que el principio de permanencia, como todos los demás requisitos de los verifactos, no opera en un sentido absoluto: hemos procurado dotar de suficiente flexibilidad a todos los principios metafísicos para hacerles funcionar por compromiso y al unísono, en vez de en una forma que excluiría las pretensiones de uno en favor de las rígidas demandas de otro. Tal vez no agrade esta concesión a los buscadores de la realidad estática, o quizá descubran en ella un triunfo para su postura, pero creemos que la ciencia debe hacerla para portarse de modo totalmente honrado.

abstracta, conserva la alineación funcional con la Naturaleza que hemos planteado como carácter de la realidad: la realidad física no es sinónima de concreción, tal como se entiende corrientemente este término.

A los elementos de la geometría se les suele llamar frecuentemente idealizaciones de las crudas inmediateces presentadas por la Naturaleza. No vamos a negarlo; pero existe un sentido en el que todo paso desde el campo *P* a las construcciones interpretativas es una idealización, una formalización sometida a requisitos metafísicos que resulta necesaria por las incertidumbres inherentes a la Naturaleza. Porque, evidentemente, si uno adopta el término *idealizar* para describir el caso especial de una regla de correspondencia que defina la construcción interpretativa "punto", debería admitir también que la *cosificación* es una forma —aunque quizá una forma más sencilla— del proceso idealizador.

Nos encontramos aquí en aparente contradicción con una opinión generalizada entre los científicos, según la cual "no existen en la naturaleza" líneas perfectamente rectas, triángulos perfectos, etc. Para restaurar la armonía necesitamos solamente examinar detenidamente lo que esta proposición implica, pues no niega realidad a los elementos de la geometría: afirma simplemente que no existen *cuerpos* que exhiban líneas perfectamente rectas o triángulos perfectos, lo cual es cierto y no contradice nuestra conclusión. Mas los elementos geométricos en sí mismos son, sin embargo, reales como constituyentes del espacio abstracto, que es una realidad física: si bien ningún cuerpo real muestra una línea recta, también es cierto que una línea recta real se extiende entre dos puntos cualesquiera del espacio (y que el espacio se compone de puntos reales); una línea en el espacio es una línea real, aunque no una línea material.

Un número es claramente un observable de una clase de objetos; es real en tanto en cuanto la Naturaleza presenta inmediateces susceptibles de ser contadas que conducen, mediante una regla de correspondencia que implica la operación de contar (definición epistémica), a la construcción interpretativa designada por un número específico, *N*. Por ello, los números son reales si existen contrapartidas existenciales disponibles para ellos. Esto es indudablemente cierto para todos los números enteros pequeños; pero, en los momentos actuales, debemos probablemente suponer que el número total de objetos discernibles existentes en el universo es finito, ya que el número de partículas elementales permanentes es del orden de 10^{80}: desde luego, éstas pueden ser ordenadas en conjuntos, cuyo número será mucho mayor, pero formarán asimismo una clase finita. Un número mayor que el de los miembros de esta clase desafiaría al criterio de realidad que hemos empleado.

Pero, verdaderamente, no estamos atados a este simple procedimiento: las reglas de correspondencia no tienen por qué ser tan directas como aquí hemos supuesto. Pues hemos engendrado ya el espacio real, con una red de elementos geométricos tan numerosos como pueda desearse, y cabe asociar unos números a esos verifactos, previamente establecidos, mediante definiciones constitutivas. Cabe que estas defini-

ciones constitutivas no produzcan nada más que construcciones interpretativas peninsulares del tipo C' (Fig. 5.1), números que estarían relacionados con el crudo material del campo P sólo por las reglas de correspondencia que les dieran significado; y habría que retirarlos la realidad La cuestión de si aparecen tales números difícilmente puede resolverse en las páginas de este libro, aunque es sumamente interesante en la filosofía de las matemáticas. (Uno de ellos puede ser el infinito.) Mi inclinación, sin embargo, es a dudarlo; pues parece que el científico, en sus esfuerzos para comprender las presentaciones de la Naturaleza, particularmente cuando racionaliza la cualidad llamada continuidad, necesita todos los números que los procedimientos ideales del matemático pueden engendrar, incluyendo el infinito y los irracionales.

No se suponga, sin embargo, a la vista de esta gran concesión, que los principios metodológicos han perdido su dominio sobre la situación fáctica y que predicen realidades racionales sin restricciones. La construcción por sí sola no basta para engendrar entes reales: las criaturas imaginadas son construcciones interpretativas, pero son irreales porque carecen de contrapartida en la Naturaleza, mientras que los números la poseen.

Tal discernimiento de los principios metodológicos se hace de nuevo evidente en la efectiva manera con que distinguen entre abstractos reales e irreales. Si la teoría general de la relatividad es correcta, el espacio euclidiano no posee realidad, aunque, naturalmente, puede ser un *útil* modelo aproximado para la descripción de la experiencia. La utilidad, el criterio del pragmatista, no sólo tiene importancia para establecer la realidad: de hecho, muchas construcciones interpretativas matemáticas se formulan primeramente sin ningún interés por su realidad; pero incluso aunque estén desprovistas de correlaciones epistémicas pueden servir al útil propósito de sintetizar muchas relaciones abstractas. Y es frecuente que, a medida que avanza la historia de la ciencia, adquieran realidad como consecuencia del descubrimiento de enlaces adecuados con la experiencia sensorial; por citar un ejemplo, las matrices han experimentado esta modificación con el desarrollo de la mecánica cuántica.

Podrían hacerse observaciones parecidas respecto de los grupos, campos algebraicos y muchas otras "ideas" de las matemáticas. Un grupo no es una mera idea, sino una parte significativa de la realidad, porque la interpretación de la Naturaleza lo exige: entre las propiedades de todo cristal figura la de constituir un grupo. Y las funciones matemáticas presentan en gran medida el mismo aspecto: la función $^1/_2mv^2$ (no sólo su símbolo o su nombre) se halla en correspondencia con ciertas experiencias de P, siendo la regla de correspondencia la definiicón operacional de la energía cinética; por otra parte, la función misma, como construcciòn interpretativa fértil, no viola ninguna de las exigencias formales que hay que imponer a los verifactos; en nuestro sentido, entonces, ser de la forma $^1/_2mv^2$ es uno de los atributos reales de la energía cinética. Pero admitimos de nuevo que ésta es una extraña forma de hablar, y

que nos estamos acercando rápidamente a una zona en la que es muy escaso entre los científicos el interés por el problema de la realidad.

A esta zona pertenece ciertamente la cuestión que hace referencia a la realidad de los *universales*. Los electrones, las longitudes de onda y los estados de los sistemas físicos son, considerados individualmente, verifactos. Pero, ¿qué decir del término electrón sin referencia a cosas singulares? Yo creo que el concepto ha de ser del tipo insular, y lo excluiría del mundo de las cosas reales; admitiría, sin embargo, que la epistemología desarrollada en este libro necesita sólo unas ligeras ampliaciones para hacer preferible el juicio inverso.

El conjunto de GIBBS, de que nos hemos ocupado en el capítulo anterior, ocupa un lugar peculiar en el terreno del ser físico: es una construcción interpretativa en el sentido inventivo de la expresión, una palpable ficción, desde el punto de vista del realismo, pues ofende gravemente al sentido común creando artificialmente una multiplicidad de sistemas cuando, manifiestamente, sólo hay uno; y de ahí que se prefiera considerarlo como un artefacto. Sin embargo, la coherencia no nos deja lugar alguno para decidir: a primera vista, tal conjunto no viola ningún principio de la metodología de la ciencia, no es estéril y permite claras reglas de correspondencia con observaciones termodinámicas; parece, por consiguiente, que estamos obligados a admitirlo como constituyente de la realidad física, independientemente del carácter grotesco que reviste. En todas estas cuentas se nos pide, en efecto, que asociemos a un cubo de agua dado una infinidad postulada de cubos de agua, para poder explicar el comportamiento termodinámico del único cubo; y la realidad de este conjunto se basa en la misma clase de pruebas que la realidad de las moléculas de que, según afirma otra teoría, se compone el agua. Nos encontramos aquí con el hecho crucial: no es posible rechazar el conjunto gibbsiano como irreal y mantener que es correcta la mecánica estadística de GIBBS.

Afortunadamente, la teoría gibbsiana es insuficiente, y queda salvada la tranquilidad del lector en materia de realidad. Pues la noción de estos conjuntos viola cierto principio: el de simplicidad. Aunque vaga en su funcionamiento, la simplicidad decide, sin embargo, en favor de la teoría molecular y de la forma de estadística introducida por BOLTZMANN y perfeccionada por otros autores; este tipo de teoría explica igualmente bien los hechos de la termodinámica, pero explica, además, muchos otros hechos observables a los que no es aplicable la estadística de GIBBS. Cuando se acepta la teoría molecular puede demostrarse el limitado éxito del método gibbsiano de cálculo, y ponerse de manifiesto que es debido a un elegante camuflaje de suposiciones moleculares, con lo que queda de relieve que el conjunto es un artefacto; así queda destruida su realidad (pero no su utilidad). El respeto a la exactitud histórica nos fuerza a añadir que GIBBS tenía completa conciencia de todo esto; para él, semejante conjunto no era más que un fructuoso algoritmo.

Hemos enumerado muchos ejemplos que son reales y otros que no

lo son. Tal vez debiera afirmarse también que las relaciones entre construcciones interpretativas, tales como las relaciones puramente lógicas de implicación o de contradicción, o relaciones cuantitativas tales como la igualdad, la de ser mayor que, etc., no deberían ser consideradas como verifactos en sí mismas: es preciso concebirlas como neutrales respecto de la cuestión de la realidad. Otro tanto cabe decir de los principios reguladores del capítulo V: si bien es muy importante su apoyo en la realidad, no pretenden ser reales por sí mismos; podría decirse que actúan como verifactores más que como verifactos.

Cabe también pensar que un análisis como el precedente, llevado a cabo con mayor escrupulosidad de lo que parecen requerir los problemas de la ciencia física, conducirá a una solución satisfactoria de la controversia entre nominalismo y realismo. Pero, en opinión del autor, el resultado obtenido no estará completamente a favor de ninguna de las dos doctrinas en cuestión.

Resumen

Las construcciones interpretativas válidas, esto es, los verifactos, son los elementos de la realidad física. Esta concepción suscita diversas cuestiones que estudiamos en el presente capítulo. Una de ellas se refiere al *status* de los verifactos en épocas anteriores a su elaboración (o descubrimiento, si se prefiere una terminología más tradicional) y tal vez después de ser rechazados, pues pocas construcciones interpretativas —si es que el caso se da en alguna— son válidas eternamente. La paradoja que parece estar involucrada en casi toda respuesta que se dé a esta cuestión se resuelve observando que, para admitir que una construcción sea válida, se requiere, a la vista de lo expuesto en el capítulo V, una *imputación de permanencia* como acto metodológico: tras haber validado una construcción hay que tratarla como poseedora de la cualidad de ser real antes de haber sido formada.

Otra cuestión se refiere a la realidad de otros yoes. Si se adopta la definición de realidad que aquí proponemos, deja de ser posible ser solipsista; pues resulta inmediatamente claro que los otros yoes, las experiencias de otros, tienen el rango de verifactos en mi propia experiencia y disfrutan, por tanto, de un *status* plenamente equivalente al de las estrellas, las piedras y los átomos.

La realidad de los datos, esto es, la Naturaleza, requiere especial consideración, pues una percepción sensible puede ser real de dos maneras diferentes. En el presente capítulo nos ocupamos brevemente de esta distinción, a la que prestaremos mayor atención en el capítulo XXI, donde hemos de desarrollar más cuidadosamente la idea de realidad histórica.

La sección 15.4 pasa revista al contenido del mundo real y trata de

las cuestiones de la realidad de entidades abstractas tales como el espacio, el número y el grupo, y plantea brevemente el problema de los universales.

BIBLIOGRAFIA

BLAKE, D., A. O. LOVEJOY, J. B. PRATT, A. K. ROGERS, G. SANTAYANA, R. W. SELLARS y C. A. STRONG: *Essays in Critical Realism,* Nueva York, Peter Smith, 1941.

DINGLE, H.: *Science and Human Experience,* Nueva York, The Macmillan Company, 1932.

DINGLE, H.: *Through Science to Philosophy,* Oxford, Clarendon Press, 1937.

EDDINGTON, A. S.: *Science and the Unseen World,* Nueva York, The Macmillan Company, 1930.

EDDINGTON, A. S.: *New Pathways in Science,* Nueva York, The Macmillan Company, 1935 [vers. cast.: *Nuevos senderos de la ciencia,* Barcelona, Montaner y Simón, 1945].

HEIDEGGER, M.: *Sein und Zeit,* M. Niemeyer, Halle del Saale, 1929 [vers. cast.: *El ser y el tiempo,* México, F. C. E., 1951 (y eds. posteriores)]. Penetrante examen *ontológico* de la existencia, de tenor opuesto a la exposición presentada en este libro.

PLANCK, M.: *Where Is Science Going?,* W. W. Norton & Company, Nueva York, 1932 [vers. cast.: *¿Adónde va la ciencia?,* Buenos Aires, Losada (3.ª ed.), 1947].

RICHTIE, A. D.: *Scientific Method,* Harcourt, Brace and Company, Inc., Nueva York, 1923.

SANTAYANA, G.: *The Realm of Matter,* Charles Scribner's Sons, Nueva York, 1930.

CAPITULO XVI

EL FRACASO DE LOS MODELOS FISICOS

16.1. La crisis de la mecánica clásica

La revolución ocurrida durante las tres últimas décadas en la concepción que el físico tenía de su universo es comparable al brusco alzamiento producido en los siglos XVI y XVII tanto en lo que se refiere a fertilidad científica como a significación filosófica. En último término, es preciso considerar aquel movimiento anterior, que culminó en las obras de Francis Bacon, Tartaglia, Galileo y Newton, como una emancipación de la doctrina física respecto de los presupuestos de la ontología escolástica, como la primera confesión franca por parte de la ciencia natural de que miraba la epistemología como el camino real hacia su meta.

La reciente transformación, pese a su carácter radical, no es fácil de describir: un aura de exotismo rodea todavía las nuevas ideas que ha engendrado, y un velo de incredulidad obnubila el juicio del asombrado investigador que reflexiona sobre su significado final; ni disponemos aún de una terminología adecuada para la debida apreciación de las consecuencias filosóficas de las nuevas teorías. En los escritos de los científicos hay dos frases no comprometedoras, y hasta cierto punto equívocas, que son las encargadas de transmitir el sabor de la física cuántica: una la señala como una transición desde la comprensión descriptiva hasta la comprensión *simbólica* del mundo físico, y la otra (que es la interpretación de Bohr) atribuye a los nuevos avances el carácter de una transcripción "complementaria" [1] de los procesos físicos. En este capítulo y en los siguientes vamos a analizar el significado exacto de estas aseveraciones, y llegaremos a la conclusión de que la teoría moderna, lejos de abandonar la epistemología como guía para la comprensión, ha reafirmado su fe en esa disciplina y ha decidido confiar en ella hasta el final, más allá de los preceptos del sentido común.

Es indispensable para este propósito una revisión de algunas cuestiones fácticas que señalan el fracaso de las hipótesis mecanicistas en el campo de la física atómica. Rogamos, pues, indulgencia al lector por la breve relación histórica que sigue.

---

[1] La primitiva palabra alemana *korrespondenzmässig* es quizá más apropiada. En líneas generales se refiere a una descripción de los procesos atómicos en términos distintos de los habituales espacio-temporales, pero equivalentes en cierto sentido a la descripción ordinaria.

La cosa comienza aproximadamente a finales de siglo, cuando el deslumbrante éxito de la aplicación universal del razonamiento mecánico había cegado a los hombres para todos los demás modos posibles de intelección. La electrodinámica, basada en el uso de modelos, había penetrado en el campo de la óptica y se hallaba en situación de dar también una buena explicación de los fenómenos térmicos; mas, de pronto, esta ciencia se detuvo ante dos importantes obstáculos que, después de muchos intentos, le resultaron imposibles de superar.

El primero se lo interpuso en su camino la espectroscopia, una naciente rama de la ciencia que era más segura que todas las demás de su propio terreno experimental. Cualquiera que mirase un espectrograma podía ver que las líneas espectrales emitidas por los átomos eran "nítidas", que tenían frecuencias o longitudes de ondas muy definidas. ¿Qué podía hacer la electrodinámica con esta observación? Se sabía que el átomo estaba compuesto por un núcleo de carga positiva rodeado de electrones negativos. Si el sistema había de ser dinámicamente estable, los electrones tenían que moverse en torno al núcleo, dotado de fuerza de atracción, en órbitas periódicas, y al moverse así sufrían aceleraciones pues no puede haber movimiento periódico sin aceleración. Aquí, sin embargo, radicaba la dificultad: de acuerdo con los principios de la electrodinámica, una carga acelerada perdía energía por radiación; en consecuencia, el electrón debía girar en espiral hacia dentro, en dirección al núcleo, cambiar la frecuencia de la rotación y, al cabo de algún tiempo, chocar con el núcleo. Esta imagen le lleva a uno, por lo tanto, a esperar un número de hechos que contradicen a la experiencia: en primer lugar, el átomo debía emitir radiaciones en todo momento, mientras que, de hecho, las emite solamente cuando es excitado (térmicamente, por bombardeo iónico, etc.); en segundo lugar, su radiación debía ser de una frecuencia en continua variación, siendo así que, en realidad, la frecuencia es constante; y en tercero, debía quedar destruido al completarse el proceso de radiación, y puede demostrarse que basta para ello una pequeña fracción de segundo; por el contrario, de hecho, el mundo ha permanecido estable durante un considerable período de tiempo. Evidentemente, algo no marchaba bien en la electrodinámica.

El segundo obstáculo surgió en un campo estrechamente relacionado con la espectroscopia: lo presentó la misteriosa conducta de los sólidos incandescentes. Cuando se calienta un sólido, sus pequeñas partes constitutivas vibran en torno a posiciones de equilibrio; el hecho de que el cuerpo emita luz invita a una aplicación de la electrodinámica, que puede explicar la aparición de emisión luminosa partiendo de la suposición de que los pequeños elementos constitutivos estén cargados eléctricamente. Nada se habría concedido más prontamente, pues existen abundantes pruebas que corroboran esta suposición; pero este módico éxito inicial queda completamente frustrado por los ulteriores detalles del cuadro: una vez que ha hecho entrada en escena, la electrodinámica realiza un trabajo completo al prescribir lo que debía suceder; en par-

ticular, especifica las intensidades con que deben ser emitidas las diversas longitudes de ondas; pero lo hace en completa contradicción con los hechos observados.

Se recordará probablemente cómo surgió la primera forma de la teoría de los *cuantos* en medio de esta confusión. PLANCK, tras haber agotado todos los medios permitidos por la electrodinámica tradicional, descubrió que una herética pero, no obstante, sencilla hipótesis, restauraba la armonía: si suponía que los constituyentes en vibración de los cuerpos sólidos se hallaban en estados de movimiento *cuantizados,* y si un oscilador dado no podía poseer ninguna cantidad de energía sancionada por el razonamiento habitual, sino sólo un múltiplo entero de un "quantum" fundamental ($h\nu$), la teoría y la observación entraban en contacto y lograban un admirable acuerdo. Pero a cambio de este éxito había que dar por perdida la sustancia de la física clásica.

El precio no le pareció elevado a BOHR, pues inmediatamente captó las grandes potencialidades del *cuanto* en otras direcciones: le resultó en seguida evidente que ofrecía la solución al problema anterior, el planteado por la nitidez de las líneas espectrales; pues si a la carga oscilante que compone un cuerpo sólido se le obliga a moverse de manera *cuantizada,* pueden imponerse otras reglas parecidas, de valores enteros, a los electrones de un átomo. El electrón, entonces, *no* irradia cuando se halla en un estado cuantizado, pues si lo hiciese no podría mantenerse la cuantización; por consiguiente, la radiación sólo se produce cuando el electrón pasa de un estado cuántico a otro. Los estados cuánticos son estados no radiantes y son, por ello, estacionarios, de modo que todo va bien mientras se mantenga un estado estacionario: así queda salvada la estabilidad del universo. Lo que sucede cuando el electrón pasa de un estado estacionario a otro es asunto distinto, que no puede ser desentrañado exclusivamente por la hipótesis cuántica.

Pero aquí BOHR se guió por los hechos que quería explicar: puesto que el salto de un electrón desde una órbita a otra implica absorción o emisión de energía, y los átomos absorben o emiten energía en forma de luz, un salto debe corresponder a la absorción o emisión de una línea espectral; ahora bien: de acuerdo con la observación espectroscópica, la línea espectral emitida durante el paso tenía una frecuencia definida, mientras que la teoría decía que, desde luego, la energía liberada lo era en cantidad definida, igual a la diferencia entre dos energías cuantizadas. ¿Qué más natural que suponer que una sea proporcional a la otra? Es así perfectamente plausibla suponer que la diferencia de energía entre dos órbitas cuantizadas, ΔE, será igual a una constante multiplicada por ν, la frecuencia de la luz emitida. Mas hallar una perfecta concordancia con la experiencia cuando esta constante recibía precisamente el valor h, previamente postulado por PLANCK, era verdaderamente asombroso.

No es preciso que nos detengamos mucho tiempo en los detalles de la teoría que resultó de la brillante conjetura de BOHR, los cuales suelen

enunciarse bajo la forma de dos postulados. El primero es una regla matemática para hallar las energías cuantizadas de un electrón, regla que será necesario explicar brevemente, porque la idea de los *números cuánticos,* que preside gran parte de la escena atómica, penetra desde bastidores a través de este postulado.

En la línea dinámica superior desempeña un importante papel la cantidad llamada *acción.* Aunque no nos interesa su significado exacto, digamos que es una variable cuyo valor aumenta a medida que avanza el movimiento; de hecho, en un movimiento periódico la acción aumenta en un total que es igual durante cada período; y en este aspecto la acción se asemeja a la variable del tiempo. Pero existe aquí una característica de mayor complejidad: si bien el sistema dinámico tiene solamente un tiempo, tiene tantas variables de acción diferentes cuantos grados de libertad posea. Podemos así imaginar una acción asociada a cada coordenada del sistema en movimiento, y cada acción aumenta en tiempo: si el electrón se mueve libremente en tres dimensiones, tiene tres grados de libertad y, por consiguiente, tres variables de acción, que llamaremos A_1, A_2 y A_3. El primer postulado de BOHR exige que el incremento de cada A que tiene lugar durante un período del movimiento estacionario, o cuantizado, sea un múltiplo entero de la constante de PLANCK, h. En símbolos,

Postulado I de Bohr:

$$\Delta A_1 = n_1 h \qquad \Delta A_2 = n_2 h \qquad \Delta A_3 = n_3 h.$$

A éste añadimos ahora el segundo postulado, que no es otro que la relación entre ΔE y ν ya enunciada:

Postulado II de Bohr:

$$\Delta E = h\nu.$$

El postulado I selecciona todos los movimientos cuantizados posibles: se los encuentra sustituyendo en lugar de n_1, n_2 y n_3 todos los números enteros desde cero a infinito, enteros a los que se denomina *números cuánticos.* El postulado II establece contacto con las observaciones permitiendo que las frecuencias ν se calculen cuando se conozca ΔE; y ΔE, a su vez, se calcula valiéndose de las ya conocidas leyes de la mecánica.

La aplicación de la teoría de BOHR al átomo de hidrógeno dio por resultado una espectacular concordancia con las observaciones en toda la línea: la precisión de las mediciones espectroscópicas era notablemente alta, pero la teoría se encontró de pronto capacitada para predecir correctamente las longitudes de ondas de las líneas espectrales hasta tantas cifras decimales como podían dar las mediciones; y la espectroscopia, hasta entonces un desesperante juego de números, reveló completamente sus secretos. Una aclamación universal saludó a la nueva teoría, y fue natural que los físicos creyeran que habían sido resueltos sus misterios más profundos; por eso es comprensible que, en la exci-

tación producida por su éxito, aquellos hombres pasaran por alto una malformación existente en la arquitectura de la teoría: pues el átomo de BOHR se asentaba como una torre barroca sobre el basamento gótico de la electrodinámica clásica.

Los "postulados" de la nueva teoría eran quizá demasiado específicos para ostentar una pretensión idónea a tal nombre: suspendiendo hábilmente la validez de la física clásica en un caso y utilizándola en otros, se nos aparecen como soberbios instrumentos reveladores que no logran que comprendamos los fundamentos. Sin embargo, cualesquiera que sean los defectos metodológicos de la primitiva teoría atómica de BOHR, puso adecuadamente de manifiesto y recalcó la generalidad de los movimientos cuantizados, y proporcionó una aplicación más amplia a una misteriosa nueva constante, la h de PLANCK. Esa teoría fue el primer paso a través de una masa de retadoras paradojas, y fue también el último intento por comprender el funcionamiento del microcosmos a base de modelos que empleaban los familiares movimientos de la mecánica visual.

Poco después de su descubrimiento se manifestó claramente lo insatisfactoria que era, de hecho, esta imagen atómica: incluso su mayor éxito, la explicación del espectro del hidrógeno, quedó frustrado por un fallo secundario; pues el número cuántico n_2, vinculado al movimiento angular del electrón, rehusó asumir el valor 0, como debía haberlo hecho, mientras que los otros tomaban ese valor. Es decir, que para obtener los resultados correctos de la energía del átomo era necesario asignar a n_1 y n_3 la sucesión 0, 1, 2..., pero a n_2 la sucesión 1, 2, 3...; y nuevos elementos de juicio, proporcionados por ciertos estudios magnéticos (fórmula g de LANDÉ) indicaron que el importante número cuántico que describía el movimiento angular era $n_2 - 1$, y no n_2. Pero si la teoría de BOHR exige diferentes reglas para diferentes grados de libertad, la sospecha de ser *ad hoc* que gravitaba sobre ella desde el principio se convierte en una amenaza incluso para su utilidad.

Las cosas, sin embargo, empeoraron aún más; la enfermedad que aquejaba al número cuántico n_2 era contagiosa. Cuando se llegó a hacer una aplicación de la teoría a otros sistemas físicos, en particular a la molécula rotatoria y a la vibratoria, aparecieron otros números cuánticos; y las observaciones sobre la separación de líneas en las bandas del espectro emitidas por tales moléculas indicaron claramente que sólo números cuánticos *semienteros* podían dar una explicación de los hechos. Además, en muchos casos en los que la teoría exigía un cuanto entero, n, las observaciones insistían en $\sqrt{n(n+1)}$. ¿Puede ser cierto entonces que los números cuánticos son a veces enteros, a veces semienteros y a veces incluso irracionales?

Quizá el más perjudicial de los fallos de la teoría fuese su incapacidad para dar explicación de los átomos que poseen más de un electrón; y este fracaso es también el más revelador, pues indica que se ha enfocado la atención equivocadamente, que se ha adherido a unas carac-

terísticas del problema atómico que, en definitiva, no pueden ser esenciales. Quizá se vea esto mejor en los intentos que se hicieron alrededor de 1915 para aplicar los postulados de BOHR a los dos electrones del átomo de helio. Para hacerlo, se necesitaban unas suposiciones específicas acerca de la posición relativa y la velocidad de los dos electrones. Se probaron todas las suposiciones posibles: se trató de localizar las dos partículas en movimiento en un único plano fijo, luego en el espacio; sus movimientos se describieron con todas las relaciones mutuas de fase concebibles; se les hizo moverse en la misma dirección y en direcciones opuestas de revolución, pero no pudo obtenerse la energía correcta del átomo de helio. Al llegar a este punto los físicos empezaron a preguntarse si una teoría debe ocuparse de detalles tan insignificantes antes de poder dar una sencilla respuesta a las cuestiones fundamentales: ¿son las construcciones interpretativas con que opera la teoría de BOHR—el sentido de revolución de los electrones, la fase de su movimiento, su ubicación en un único plano—afines al problema que nos ocupa?; ¿podrían los experimentos guiarnos alguna vez hasta su conocimiento?

Esta creciente carga de detalles menudos que se amontonaban sobre las nociones teóricas llegó gradualmente a considerarse como un juicio desfavorable contra la metodología implicada por éstas. Finalmente, cuando en 1925, GOUDSMIT y UHLENBECK descubrieron lo que recibe el nombre de giro o espín *(spin)* del electrón, la imaginación científica se vio distendida hasta el punto de ruptura: para explicar las observaciones espectroscópicas parecía necesario suponer que el electrón gira en torno a su eje y produce con ello un impulso magnético; pero, al hacerlo así, el viejo electrón esférico (de LORENTZ) giraba tan de prisa que un punto de su circunferencia se movía a una velocidad 300 veces superior a la de la luz. Aquí la teoría se tornaba increíblemente específica y, lo que es peor, parecía violar los seguros hechos de la relatividad.

La estructura teorética que sucediese a la enfermiza teoría de BOHR tendría que ser, al parecer, menos específica en las exigencias que formulase sobre el previo conocimiento de los detalles estructurales de los átomos: tendría que ser más modesta en sus pretensiones.

16.2. EL DUALISMO ENTRE ONDAS Y PARTÍCULAS

La comprobación de que las dificultades surgidas con la teoría física eran de una especie extraordinaria, con sus raíces alargándose hasta alcanzar los básicos estratos de la filosofía, se hizo evidente cuando se contempló el dilema atómico en relación con una paradoja más desconcertante aún, relativa a la naturaleza de las partículas elementales. Esta paradoja se presentó principalmente con respecto a las *ondas luminosas* y a los *electrones,* a los que vamos a limitar el estudio, pero afecta en igual medida a todos los demás constituyentes elementales de la natu-

raleza: protones, neutrones, mesones y neutrinos. La mejor manera de presentar los hechos de la situación es bajo cuatro epígrafes: I*a* y *b*, y II*a* y *b*, con numerosos subcasos, según hacemos a continuación (nuestro resumen va a ser muy sucinto, ya que el material es elemental y bien conocido):

I. *a) Pruebas en favor de que la luz son ondas*

1. La *propagación* de la luz está descrita por el principio de HUYGENS; este principio fue demostrado matemáticamente por HUYGENS, YOUNG y KIRCHOFF, y sólo cabe demostrarlo así sobre la premisa de que la luz es un movimiento ondulatorio, ya sea mecánico o electromagnético. NEWTON, que contradijo a HUYGENS sobre bases muy plausibles y sostuvo una tesis que atribuía a la luz propiedades tanto corpusculares como ondulatorias, no logró triunfar sobre la demostración de este físico.

2. La *interferencia* de la luz es completamente incomprensible en ningún modelo que no sea un modelo de ondas, pues dos partículas no pueden destruirse una a otra, mientras que una onda puede anular los efectos de otra si los máximos de una coinciden con los mínimos de la otra.

3. La *difracción,* que es una forma de interferencia, conduce a la misma conclusión.

4. La luz puede estar *polarizada,* esto es, tener diferentes propiedades en diferentes direcciones transversales a la línea de propagación. La explicación más natural de este conocido hecho consiste en suponer que la luz es una onda *transversal,* en la que la vibración forma ángulo recto con la dirección de propagación; y todos los experimentos concuerdan con esta interpretación. Desde luego, la polarización no contradice totalmente la hipótesis de *corpúsculos* de luz, ya que puede suponerse que éstos son asimétricos y establecer así una dirección transversal a la de propagación que sea preferida; pero todos los elementos de juicio disponibles y el carácter artificial de esta suposición militan fuertemente en contra suya.

5. Nunca se ha observado que la luz posea una *masa intrínseca:* se sabe que cuando se halla en tránsito posee energía y momento y, por consiguiente, una masa relativista; pero nadie ha detenido todavía la luz y la ha pesado. Esta es, sin duda, la principal consideración que hizo inaceptable la hipótesis corpuscular para los primitivos investigadores; e incluso hoy en día se hace violento concebir una onda *con* masa o una partícula *sin* ella.

b) Pruebas en favor de que la luz es corpuscular

Los corpúsculos de luz se denominan fotones, nombre que utilizaremos siempre que sea conveniente. Los primeros argumentos de NEWTON en favor de la hipótesis de los fotones (véanse las "Preguntas" en su

libro sobre la *Optica*), si bien ingeniosos e interesantes, se basaban en unos conocimientos fragmentarios, por lo cual no nos ocuparemos aquí de ellos.

1. El descubrimiento de PLANCK de las *energías cuantizadas* sugería por primera vez desde NEWTON que la luz podría no ser una onda: pues una onda transporta su energía continuamente a través de su extensión espacial, y la forma más fácil de explicar los *cuantos* de energía es postular trozos o dardos de luz, suponer fotones discretos. El que esos trozos sean partículas no está directamente indicado por la idea de PLANCK, pero es particularmente compatible con ella.

2. El *efecto fotoeléctrico* recibe una explicación sumamente natural dentro del marco de la hipótesis de los fotones, como EINSTEIN fue el primero en advertir. Cuando la luz incide sobre una superficie metálica, hay electrones que saltan fuera de ella: estos electrones, que normalmente residen plácidamente dentro del metal, extraen energía de la luz incidente cuando éste la absorbe, y cuando han acumulado energía suficiente pueden desprenderse de su confinamiento metálico. Valiéndose de otros métodos, es posible medir el total de energía necesario para que un electrón se libere así, y no es difícil entonces computar el tiempo en el que una onda luminosa de intensidad conocida transmitiría la energía necesaria a un electrón. Supongamos que el tiempo es un segundo, por ejemplo; evidentemente, si la luz es una onda, y si esta concepción es acertada, hemos de proyectar la luz sobre la superficie durante un segundo por lo menos antes de que el primer electrón pueda dar su salto fotoeléctrico; y tras él esperamos que venga un enjambre de seguidores. No se observa esto, sin embargo: por el contrario, el primer electrón surge casi inmediatamente, sin esperar el decoroso tiempo de un segundo; no manifiesta interés alguno por la conservación de la energía ni por nada de lo que implicaba en este punto la imagen de la onda; ni tampoco lo hacen los otros: saltan cuando les place, pero siempre de modo que se mantenga una igualdad entre la energía *media* de los electrones y la energía extraída de la onda.

Sin duda, la forma más sencilla de hacer plausible este frívolo comportamiento de los electrones es privar a la luz de continuidad: si la luz consistiera en dardos del tipo del fotón, y si tales dardos estuviesen distribuidos al azar por la región que normalmente llamamos la onda, los electrones del metal, al ser golpeados por los dardos, deberían emerger en una sucesión caótica. Esta idea cualitativa adquiere precisión y fuerza vinculante cuando se la empareja con el descubrimiento de PLANCK; o sea, cuando se asigna una energía $h\nu$ a todo fotón de frecuencia ν: entonces, como demostró EINSTEIN, hasta los rasgos cuantitativos del efecto fotoeléctrico se pliegan a una explicación satisfactoria. En este punto se nos pide que pensemos en la luz como en un enjambre de dardos (fotones), cada uno de ellos equivalente a un paquete de energía que contuviese $h\nu$ ergios de energía; pero qué "aspecto" tiene un

fotón o cómo se las arregla un dardo para tener una frecuencia ν son cuestiones sobre las que guardamos un respetuoso silencio.

3. Ocurre lo contrario del efecto fotoeléctrico cuando se producen los *rayos X:* en un tubo de rayos X, los electrones inciden sobre una superficie metálica y liberan fotones (en este caso rayos X, que son fotones de gran ν). También aquí el asunto es satisfactorio si cada fotón se halla provisto de una energía $h\nu$, energía que en este caso se extrae de los electrones incidentes; y de ahí que la producción de rayos X apunte a la misma conclusión que el efecto fotoeléctrico, a saber: que los fotones son manojos de energía que se mueven a través del espacio de manera puramente aleatoria.

4. Si la acumulación de testimonios empíricos está empezando ya a estrangular a la onda, el *efecto Compton* le asesta el golpe final. Una de las cosas más seguras que sabemos acerca de una onda es que no puede cambiar de frecuencia una vez que ha adquirido existencia: cambiará su velocidad de propagación y su longitud de onda al pasar de un medio a otro, su dirección se alterará en la reflexión y en la refracción, pero la cantidad ν está indeleblemente marcada en ella como parte de su propia y verdadera naturaleza. Por lo tanto, el descubrimiento de COMPTON, en 1923, según el cual la dispersión de rayos X por objetos materiales alteraba su frecuencia, fue verdaderamente asombroso. Mas esta grotesca violación de los principios del movimiento ondulatorio encontró sanción automática cuando se lo consideró como una interacción de *partículas:* COMPTON hizo ver con hermosa sencillez que si un corpúsculo de energía $h\nu$ (y con el correspondiente impulso o momento, $h\nu/c$) choca con una partícula material, retiene después de la colisión una energía menor, $h\nu'$, que concuerda exactamente con la frecuencia alterada ν', que se observa en los experimentos de dispersión. Así, la luz no solamente aparece como un enjambre de partículas en lo que a su energía de cuantización se refiere, sino que se comporta realmente como partículas en colisión con otras partículas de materia.

5. Menos definido, pero igualmente impresionante, es el testimonio ofrecido por el funcionamiento de los contadores de Geiger. Estos instrumentos, tan utilizados en nuestra atómica era, indican el paso de partículas cargadas; esencialmente, un contador es una vasija cuyo interior está sometido a una alta tensión eléctrica, un cilindro que mantiene un campo eléctrico cerca de su valor de ruptura; si se aumenta su potencial, tiene lugar una descarga eléctrica, que es registrada por amplificadores conectados con el instrumento. Esta perturbación en el potencial ocurre cuando una *partícula* cargada pasa a través de la vasija, como puede verse fácilmente; mas lo notable es que también sucede cuando un *fotón* de alta energía (por ejemplo, un rayo gamma) pasa a través de la vasija. Pero se hace difícil comprender cómo puede una onda tropezar con el contador, o cómo puede tener las claras propiedades direccionales, el carácter semejante al de un dardo que le hace atravesar una vasija y no otra.

II. *a) Pruebas en favor de que los electrones son corpúsculos*

1. Desde un principio, se admitió que bajo la forma de rayos catódicos, los electrones eran portadores de una *carga eléctrica* negativa; hecho que se manifestaba en la desviación sufrida por los rayos beta cuando se los enviaba a través de campos eléctricos y magnéticos. No quedó, por tanto, duda respecto a su naturaleza corpuscular, ya que es imposible de concebir una manera por la que una onda pueda transportar carga.

2. Igualmente decisiva y asentada por los mismos experimentos fue la conclusión de que los electrones transportan *masa*. WIECHERT y KAUFMANN determinaron la razón entre carga y masa de un electrón con la suficiente exactitud como para poner de relieve su diferencia de los iones de la electrólisis, y THOMSON realizó la primera medición cuantitativa de esta razón valiéndose de métodos que la mayoría de los estudiosos recuerdan de la época de cursos de iniciación a la física. Parece inconcebible que una onda pueda tener carga y masa.

3. Luego se descubrió que las *velocidades* de los electrones tenían valores dependientes de la diferencia de potencial a lo largo del tubo de rayos catódicos. La cuestión que aquí interesa es que aparezcan diversas velocidades en el mismo medio, el vacío del tubo: pues las ondas electromagnéticas, que son las únicas ondas que se transmiten en el vacío, se mueven con una sola y única velocidad. Esta observación produjo gran asombro, y se la consideró como una nueva corroboración de la naturaleza corpuscular de los electrones.

4. El célebre experimento de MILLIKAN permitió una medición independiente y precisa de la *carga de electrón*. Logró sujetar un electrón sobre una gota de aceite y determinar la fuerza eléctrica que lo mantendría quieto; esto es, que impediría la caída de la gota. Tan interesante por lo menos como la ingeniosidad del dispositivo experimental y su conocido éxito práctico para la ciencia es la circunstancia que raras veces se hace resaltar, de que aquí, aparentemente por primera vez, se hacía estar inmóviles a los electrones, cosa que, evidentemente, no haría ninguna onda que se respetase.

5. Tal vez parezca superfluo aducir nuevas pruebas. Pero, ciertamente, no puede dejarse de mencionar la cámara de niebla de WILSON: como todas las demás partículas cargadas, los electrones dejan un reguero de gotitas como testimonio visible de su trayectoria, y es fácil fotografiar y estudiar tales gotitas. Por el contrario, apenas cabe concebir cómo una onda no colimada, libre de extenderse por el espacio, podría dejar surcos como los observados por WILSON.

b) Pruebas en favor de que los electrones son ondas

1. En 1924, LOUIS DE BROGLIE escribió una transcendental tesis doctoral: cerrando los ojos al contenido intuitivo de la física clásica,

inquirió cuáles serían las consecuencias formales de combinar la teoría de la relatividad con la hipótesis de los *cuantos,* de PLANCK. Su razonamiento es tan sencillo que sentimos la tentación de reproducirlo en sus líneas generales. Según BOHR y PLANCK—razonaba—, la energía E de un sistema físico está relacionada con cierta frecuencia, ν, por la relación

$$E = h\nu. \tag{16.1}$$

Asignemos, por tanto, a un electrón un "fenómeno" vibratorio de frecuencia ν (pero sin preguntarnos cómo cabría imaginarse éste ni cómo podría mantenerse mecánicamente).

Un observador que se mueva adelantando al fenómeno con una velocidad v lo verá, no como una vibración hacia arriba y hacia abajo, sino como uno *onda* progresiva. La teoría de la relatividad, invocada en este punto, demuestra fácilmente, por sencillos pasos que aquí emitimos, que esta onda avanza con una velocidad

$$V = \frac{c^2}{v}. \tag{16.2}$$

y no, como podría haberse esperado ingenuamente, con la velocidad del observador, v. La constante c es la velocidad de la luz. Hagamos ahora uso de la relación de EINSTEIN entre la masa y la energía:

$$E = mc^2 \tag{16.3}$$

Combinando las ecuaciones (16.1) y (16.3) se halla

$$h\nu = mc^2 \tag{16.4}$$

Pero, de acuerdo con (16.2), $c^2 = vV$, y, por consiguiente, de (16.4),

$$h\nu = mvV \quad \text{o} \quad \frac{V}{\nu} = \frac{h}{mv}.$$

Ahora bien: recordará el lector que el cociente entre la velocidad de la onda, V, y la frecuencia, ν, de una onda, es la longitud de onda, λ. De ahí la famosa fórmula de BROGLIE,

$$\lambda = \frac{h}{mv}. \tag{16.5}$$

Resumiendo, la precedente argumentación se reduce a lo siguiente: si tanto EINSTEIN como PLANCK tienen formalmente razón en sus aseveraciones, un electrón—en realidad, cualquier partícula de masa m—lleva asociada consigo una longitud de onda cuyo valor está dado por la ecuación (16.5). Esta es una conclusión extraña: ¿significa, acaso, que los electrones, como otros sistemas físicos que muestran longitudes de ondas, pueden ser obligados a interferir, a difractarse y a polarizarse?

2. En 1927, DAVISSON y GERMER, de la Bell Telephone Company,

descubrieron accidentalmente que un haz de electrones, reflejado por un cristal de níquel, mostraba una figura de difracción muy semejante a las producidas por los rayos X. A partir de tal figura, podía ser computada la longitnud de onda de los electrones, y *concordaba con la fórmula* (16.5).

3. En 1928, G. P. THOMSON, hijo de la persona que por vez primera "demostró" la naturaleza corpuscular de los electrones, hizo pasar rayos catódicos rápidos a través de láminas de metal y observó la formación de anillos de difracción semejantes a los producidos cuando se lanzan rayos X a través de polvos cristalinos. Una vez más, la longitud de onda calculada a partir de los anillos proporcionó una confirmación de la fórmula de BROGLIE.

4. Un año después, RUPP, en Alemania, *difractó* electrones por medio de retículas ópticas y demostró la validez de la misma fórmula por el método standard empleado en el espectroscopio; o sea, utilizando retículas graduadas. En esta fase, la naturaleza ondulatoria de los electrones quedó demostrada más allá de toda duda *, y comenzó la utilización del nuevo conocimiento en el diseño de microscopios electrónicos.

5. Entretanto, gran cantidad de experimentos habían demostrado la posibilidad de *polarizar* electrones. De hecho, el giro del electrón, estudiado en la sección precedente, resultó no ser sino la dirección de polarización de las ondas electrónicas.

Efectivamente, el electrón posee *todos* los atributos normales de las ondas.

16.3. LA NATURALEZA FUNDAMENTAL DE LAS PARTÍCULAS ELEMENTALES Y LA BRUMA DE LO INMEDIATAMENTE DADO

El científico impregnado de teoría tradicional exigirá ahora saber *cuál es* la verdadera naturaleza del fotón, *cuál es* la verdadera naturaleza del electrón. ¿Son estos constituyentes elementales del mundo físico una mezcla de partículas y ondas o no son ninguna de ambas cosas? Por lo común se admite la teoría de la mezcla; y para darle curso normal y sanción verbal, EDDINGTON inventó la palabra "ondícula" como término descriptivo presumiblemente apropiado para el electrón. Esto añade un placentero giro a nuestra investigación, y tienta a quien no se halle poseído de demasiado sentido crítico a creer que la teoría de la mezcla es una solución del problema. Sin embargo, al reflexionar con más detenimiento se ve uno obligado a decir que tal juego de palabras, lejos de representar una solución, destruye incluso los medios de al-

---

* Véase, sin embargo, la distinta interpretación de DUANE (1923), que recoge ALAUDÉ en varias obras, señaladamente en *New Foundation of Quantum Mechanics*, Cambridge, Cambridge University Press, 1965; versión castellana, *Nuevos fundamentos de la mecánica cuántica*, Madrid, Tecnos, 1968. (*T.*)

canzar alguna; pues trata de persuadirnos de que no existe problema; pide al filósofo que se entretenga en juegos verbales cuando debería ocuparse de sus asuntos; sin embargo, su instinto natural de que no puede haber una ambigüedad fundamental en el terreno de las últimas cosas es sólido, y hemos de esperar que no ceda a la fácil palabrería dualista del físico [2].

Para aclarar el problema observemos en primer lugar que las propiedades notorias de ondas y partículas son *incompatibles,* de modo que es absurdo situarlas juntas como si fuesen meramente *diferentes:* es perfectamente posible decir que un determinado animal es un caballo y una bestia de carga, pero no que es un caballo y una vaca. Además, los aspectos de onda y de partícula *no agotan el carácter de un electrón,* por más que hayan desempeñado importantes papeles en la literatura física Ciertamente, no son términos menos apropiados para el electrón los de "carguícula" y "carga de onda". Pero existe un tipo básico de entidad, distinto de la partícula, la onda y la carga, que no se ha estudiado recientemente en cuanto a la medida en que pueda reproducir el comportamiento del electrón: es el vórtice. Ciertas interesantes propiedades de las masas cargadas (cohesión, atracción) pueden, en efecto, explicarse satisfactoriamente suponiendo que sean vórtices en un fluido perfecto. pero la moda actual ha dejado de lado esta intrigante analogía * por esta razón, y no por ninguna otra, no se han propuesto los nombres de "espirácula" y "onda espiral".

Los electrones y los fotones no son *ni* partículas *ni* ondas: no son ni una ni otra cosa más de lo que son calientes o fríos, rojos o azules. Y al decir esto se debería señalar, haciendo especial hincapié en ello, que tal afirmación no constituye una admisión de ignorancia; pues tenemos la pretensión de reclamar como hecho positivo, que un electrón no es ni una partícula ni una onda, y negamos que no sepamos qué es: como se verá más adelante, el físico tiene un conocimiento muy exacto de la naturaleza del electrón; pero se trata de una clase de conocimiento no traducible a términos como *onda, partícula, rojo, azul, caliente* o *frío.* Después de todo, ¿por qué había de ser traducible así?: si un objeto visible no tuviera cualidades visibles, ello sería causa de estupefacción; pero si una construcción interpretativa intrínsecamente invisible no las manifiesta, más parecen confirmados que dañados la coherencia y el orden.

Existe otro ángulo, quizá más interesante, desde el que es posible contemplar estos hechos. Antes (en el capítulo IV) hemos hablado de la bruma de lo inmediatamente dado y hemos demostrado asimismo que la percepción cruda, cuando se la examina adecuadamente, repudia siempre la certidumbre del detalle: sólo los procedimientos constructorios ga-

---

[2] El propio EDDINGTON, naturalmente, quedó a salvo de todo reproche en su tratamiento filosófico del problema de la "ondícula".

* Como es sabido, a partir de 1945 se han comenzado a formular teorías en esta dirección, especialmente por el físico inglés D. BOHM. (*T.*)

rantizan la estabilidad y reflejan cierta medida de estabilidad sobre el plano de la percepción. La lección que ahora hemos aprendido consiste en que la parte de la Naturaleza correspondiente a las construcciones interpretativas, electrón y fotón, resulta ser incierta, intrínsecamente incierta con respecto a las usuales cualidades sensibles que estos términos han transmitido en otros tiempos.

Para aprehender la realidad, el físico ha tenido motivos para seguir el consejo: no te harás ninguna imagen grabada o esculpida...

Hecha esta renuncia, resulta una nueva actitud, más libre que la antigua y circunscrita, sin embargo, por los mismos inalterados principios metodológicos, igualmente enraizada en la confirmación, una actitud que aporta nuevo vigor a la solución de persistentes problemas. Anotemos aquí únicamente, como ejemplo de su saludable carácter, una consecuencia del nuevo enfoque, a saber: la prosa que ofrece de resolver el problema de la *causación,* que, como veremos después, había quedado enmarañadísimo bajo los ataques del razonamiento mecanicista.

Supongamos que *tuviéramos* que pensar en el electrón como en una partícula: nos veríamos entonces forzados a atribuirle una forma y un tamaño definidos, precisamente como se hacía en los tiempos anteriores a la física cuántica. Cierto es que la experiencia nunca ha revelado esas propiedades y, por consiguiente, que la teoría que las requiere se embaraza a sí misma con cosas inesenciales; pero esto, podría decirse, es desafortunado, pero no destructivo para el descubrimiento de causas. Nuestra atención se centra aquí en un problema de mucha magnitud, sin embargo: sobre la posibilidad de una descripción causal. Pues un electrón de un tamaño definido *tiene que* poseer una estructura interna, que no puede mantenerse eternamente oculta a la investigación del hombre de ciencia: siempre alzarán la cabeza cuestiones tales como las concernientes a las fuerzas que retienen la carga del electrón (las que impiden la explosión de sus elementos repulsivos). Así, pues, el marco mecanicistamente pormenorizado de las concepciones del físico le hace comprometerse en último término, lo desee o no, a considerar la partícula como un agregado infinito de puntos, cada uno de los cuales tiene su complemento normal de seis variables de estado; el comportamiento del electrón queda entonces determinado por los movimientos de tal agregado infinito, y, a menos que estos movimientos tengan una especial y adventicia sencillez (como ocurre en un cuerpo rígido, por ejemplo), queda sacrificada sin remisión toda posibilidad de describir *completamente* la partícula, pues una infinidad de factores causales es completamente inmanejable y acaba consigo misma. El razonamiento mecánico está siempre amenazado por esta catástrofe causal, y, por esa razón, entre otras, la mecánica como modo último de comprensión está predestinada a ser insuficiente.

La nueva teoría evita el desastre haciendo innecesaria la pregunta acerca de las cuestiones del tamaño, la forma y la naturaleza partícula-onda de los electrones, al admitir desde el principio un hecho cardinal:

la incertidumbre de lo inmediatamente dado. De este modo salva la causalidad en el microcosmos y demuestra también por qué la descripción mecánica es válida hasta un grado extremadamente alto de aproximación

Al esbozar la necesidad de una actitud nueva y más liberal nos hemos mostrado ligeramente incoherentes; pues la única conclusión que autoriza nuestra premisa es que los sistemas elementales, como los electrones y los fotones, no tengan los particularizados aspectos de corpúsculos, ondas o vórtices. Juntamente con esto, sin embargo, existe un aspecto aún más drástico de la física moderna, del que ya hemos dado algunas indicaciones anteriormente en este libro: se trata de que unas cualidades tan básicas como la posición en el espacio y el tiempo son incapaces de tener un significado universal. En la sección 3.4 hemos ofrecido un sencillo ejemplo en apoyo de esta tesis más radical; y en el apartado siguiente describimos con mayor extensión otro de los convincentes ejemplos que nos obligan a denegar a los electrones una ubicación única.

16.4. ¿Dónde está el electrón?

El físico clásico, al dar caza al electrón con un pertrecho instrumental no idóneo, forzó a su presa a refugiarse en una apariencia dual: se presentaba como una partícula porque tenía carga y masa, como onda porque no tenía posición definida. Para comprender el significado de esta ultima aseveración es conveniente que consideremos los tres experimentos posibles que describimos más adelante. El primero es muy conocido; y los otros son versiones simplificadas del proceso que tiene lugar cuando los electrones quedan difractados por cristales y en microscopios.

1. Imaginemos una plancha o pantalla de acero, *P*, con un orificio circular, y un fusil a cierta distancia de ella apuntado sobre el centro del orificio *O* (figura 16.1); detrás de la pantalla hay un blanco, *B*, en el que quedan registrados los impactos. Naturalmente, *O* será lo suficientemente grande como para permitir el paso de las balas, y supondremos que pueda variar de tamaño. Ciertas influencias incontrolables (viento, vibraciones) harán que algunas de las balas fallen el orificio cuando se dispare el arma, pero las que pasen por él en una larga serie de disparos formarán un dibujo o gráfica en la pantalla, blanco *B*: la mayoría de las balas se alojarán cerca del centro de la gráfica formada por los impactos, y existirá un descenso gradual de la densidad de éstos hacia la periferia, donde se interrumpirán bruscamente; cosa que hemos representado en la figura 16.2*a*.

Cuando se hace más pequeño el diámetro del orificio se reduce el tamaño de la gráfica de impactos, pero la densidad permanece invariable en todos los puntos, aunque se recorta el borde.

Si se practica otro agujero en la pantalla *P*, inmediatamente debajo

del primero y se repite la serie de disparos, *no se ve afectada* la gráfica de la figura 16.2*a*, mas aparece una segunda gráfica semejante a la primera (con distinta distribución de densidad, desde luego) debajo de él. Todas estas observaciones reciben explicación satisfactoria cuando se piensa en las balas como partículas que cruzan o no a través del orificio único o que, en presencia de dos de ellos, o bien golpean sobre la plancha o cruzan por uno de los dos hasta llegar a *B*. No encontramos aquí ninguna dificultad de concepción.

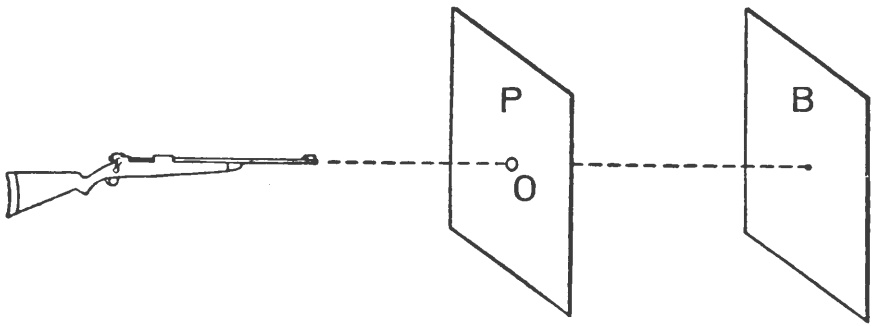
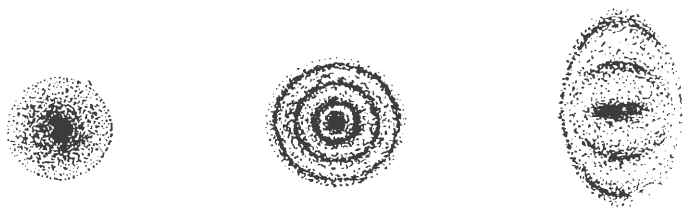


Figura 16.1

2. Para el siguiente experimento sustituimos el fusil por un cañón de electrones, que es un instrumento que acelera electrones como un cartucho acelera una bala al hacer explosión. Ahora se utilizan también dos pantallas, la primera con un orificio circular y la segunda para que sirva de blanco; pero se reducen en forma apropiada las distancias y tamaños de todos estos objetos.

Cuando dispara dicho cañón se observa un dibujo o gráfica de impactos de electrones en *B*, pero se trata de un dibujo de diferente especie al de antes: en vez del descenso monótono de intensidad hacia el



(*a*) (*b*) (*c*)

Figura 16.2

borde, se ve ahora la serie de anillos circulares representados cualitativamente en la figura 16.2*b*. Los impactos se extienden bien dentro de la región que quedaba libre de impactos debido al borde del orificio; y la densidad de la gráfica no termina bruscamente, sino que decrece gradualmente hasta cero.

Cuando se hace más pequeño el diámetro del agujero, la gráfica, en conjunto, se *dilata,* a la vez que cambia la intensidad en todos sus puntos. Difícilmente puede esto explicarse considerando los proyectiles como partículas, a menos que uno los haga inclinarse en torno al borde del orificio y a menos que uno suponga que el grado de inclinación es mayor cuanto más pequeño sea el agujero. Desde luego, el comportamiento descrito es característico de las ondas. Pero queremos ahora adoptar la actitud a que nuestra previa consideración nos ha comprometido, pues nada se gana y se pierde mucho alegando neciamente que en un extremo del experimento (en el cañón acelerador) el electrón es una partícula y en el otro extremo es una onda: seamos, pues, coherentes y veamos qué le sucede a la "partícula" salida del cañón. Evidentemente, su trayectoria ha sufrido una desviación alrededor del borde del agujero en *P*; ¿o acaso no tenía *trayectoria*?

3. Repitamos el segundo experimento con dos orificios en la pantalla en lugar de uno; la gráfica que ahora se observa no es una yuxtaposición o superposición de dos como la de la figura 16.2*b,* sino un dibujo enteramente nuevo, que se muestra en la figura 16.2*c*. Este resultado, quizá inocente a primera vista, se halla henchido de un siniestro significado: ¡el electrón que atraviese el orificio superior debe de haber modificado su comportamiento debido a la presencia del inferior! Esta es, al menos, la conclusión a que nos vemos obligados a llegar siguiendo la mecánica interpretación de sucesos en el tiempo y el espacio. Uno se siente ya incómodo y confía en que no se le pida que explique la presunta interacción entre el electrón y el orificio adicional a través del cual no ha pasado. Pero las dificultades no terminan aquí.

Una comparación de las gráficas 16.2*b* o 16.2*c* con la 16.2*a* revela inmediatamente que *b* y *c* no pueden en ningún caso explicarse por errores fortuitos, pues si esa explicación fuese correcta una disminución en el tamaño del orificio reduciría el tamaño de la gráfica, mientras que lo que ocurre es lo contrario. Las gráficas *b* y *c,* por consiguiente, tienen que ser resultado de alguna especie de connivencia entre las entidades que los producen; y no servirá adscribirlos a una interacción física entre las entidades y el orificio, porque un único electrón produce solamente un único impacto, mientras que la gráfica, sin embargo, es el resultado de muchos impactos sucesivos. Ahora bien: a los electrones que forman las gráficas soló puede imputárseles razonablemente una connivencia mientras se les ofrezca una posibilidad de colaborar; esto es, en tanto en cuanto se acerquen al orificio u orificios juntos o, por lo menos, en sucesión lo suficientemente rápida para tener ocasión de entablar la connivencia.

Para comprobar este punto podemos disparar el cañón a intervalos temporales muy considerables, de modo que pueda suponerse con suficiente certeza que el destino de un proyectil es independiente del de los demás. Y he aquí que después de muchos impactos de los proyectiles individuales en la pantalla se obtienen los mismos resultados en lo que

se refiere a la gráfica obtenida; mas si cada electrón tuvo conocimiento del agujero que evitaba, ¿cómo supo a través de qué orificio habían pasado sus predecesores y a través de cuál habían de pasar sus sucesores?; ¿cómo logró esa correlación con la actuación de sus precursores y sucesores que se manifiesta en la regular gráfica de la pantalla objetivo? En este punto, antes que invocar una misteriosa influencia a través del tiempo, se ve uno obligado a admitir que *cada electrón pasó a través de ambos orificios a la vez,* o que *cada uno tenía alguna disposición inherente para formar la gráfica que sólo todo el agregado era capaz de realizar.* Las ondas electrónicas fueron inventadas por el modelo tendente a evitar enfrentarse con este problema.

Cualquiera que *sea* la entidad, en el instante de atravesar la primera pantalla no tenía una posición determinada. Y no decimos que su posición exacta no fuera observada o no pudiese serlo: es que no tenía ninguna.

En este punto nos hallamos ya preparados para presentar la estructura básica de la mecánica cuántica, la teoría que une estos extraños testimonios en una profunda unión orgánica. Sus principios son abstractos, pero no creemos que sean difíciles de comprender cuando recordamos que se aparta de todos los modelos: solamente el habitual afán de modelos mecánicos es lo que hace difícil y obscura a la física moderna. En nuestra exposición haremos sólo muy ligero hincapié en la interesante estructura matemática de que se halla revestida la teoría de los *cuantos*[3]; lo que queremos es destacar los axiomas y relaciones lógicos y epistemológicos para someterlos a un cuidadoso examen.

Resumen

El capítulo XVI comienza con un breve resumen de la historia reciente de la física atómica. Procede luego a desarrollar cuidadosamente el famoso dualismo (naturaleza de onda-partícula) que afecta a todas las partículas elementales. Revisamos en primer lugar las pruebas fácticas en favor de cada una de las cuatro proposiciones siguientes:

I*a*. La luz son ondas.
I*b*. La luz se compone de corpúsculos.
II*a*. Los electrones son corpúsculos.
II*b*. Los electrones son ondas.

Se analiza luego el significado de la aseveración de que *no podemos conocer* algunas de las propiedades de electrones y fotones, y concluimos

[3] Puede estudiarse la estructura matemática de la mecánica cuántica en algunos de los libros citados en la bibliografía del capítulo XVII. Para una versión sucinta y razonablemente sencilla, véase Margenau y Murphy: *The Mathematics of Physics and Chemistry,* Nueva York, D. Van Nostrand Company, Inc., 1943, capítulo 11.

que no existe ningún dualismo, que ni unos ni otros tienen posición exacta en el sentido intuible[4] y mecanicista de la palabra. La posición se ha convertido en un observable latente.

Para esclarecer con todo detalle estas cuestiones, la última sección presenta un análisis del problema de la difracción del electrón, que, interpretado de cualquier manera que no sea la expresada más arriba, conduce a la absurda situación de que una única partícula, en un sólo paso desde un punto a otro, puede seguir dos caminos distintos.

BIBLIOGRAFIA

BOHR, N.: *The Theory of Spectra and Atomic Constitution,* Cambridge University Press, Londres, 1922.

DE BROGLIE, L.: *Matter and Light,* Nueva York, W. W. Norton & Company, 1939 [ed. orig.: *Matière et Lumière,* París, Albin Michel, 1937; vers. cast.: *Materia y Luz,* Buenos Aires, Espasa Calpe, 1942].

DAVISSON, C., y GERMER, L. H.: "Diffraction of Electrons by a Crystal of Nickel", *Physical Review,* 30:705 (1927).

EINSTEIN, A., e INFELD, L.: *The Evolution of Physics,* Nueva York, Simon and Schuster, Inc., 1938 [vers. cast.: *La Física, aventura del pensamiento,* Buenos Aires, Losada (7.ª ed.), 1965].

LANDÉ, A.: *Fortschritte der Quantentheorie,* Dresde, Steinkopf, 1926.

MILLIKAN, R. A.: *The Electron,* Chicago, University of Chicago Press, 1917.

OLDENBERG, O.: *Introduction to Atomic Physics,* Nueva York, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1949.

REICHE, F.: *The Quantum Theory,* Nueva York, E. P. Dutton & Co., Inc., 1930.

REICHENBACH, H.: *Philosophic Foundations of Quantum Mechanics,* Berkeley, University of California Press, 1944.

RUARK, A. R., y UREY, H. C.: *Atoms, Molecules and Quanta,* Nueva York, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1930.

TAYLOR, L. W.: *Physics,* Houghton Mifflin Company, Boston, 1941.

[4] La palabra *intuible* significa aquí (y en todos los demás lugares de este libro) concebible o representable en términos de modelos meceánicos, como la palabra alemana *anschaulich.*

CAPITULO XVII

IDEAS BASICAS DE LA MECANICA CUANTICA

17.1. Orientación

La terminología de esta rama de la física está todavía fuertemente condicionada por su reciente origen, y su misma torpeza semeja a veces confusión. Esto hace que parezca apropiado formular unas cuantas observaciones introductorias con vistas a una orientación general.

No existe acuerdo respecto al nombre del tema que vamos a tratar. Se le denomina a veces *mecánica de matrices,* a veces *mecánica ondulatoria* y en la actualidad, más comúnmente, *mecánica cuántica.* Cada uno de estos nombres está apoyado por una buena razón histórica, y resulta instructivo recordar brevemente cómo llegaron a adoptarse.

En 1924 Heisenberg descubrió un cálculo que permitía predecir con gran éxito algunas de las propiedades de los sistemas atómicos; el primer nombre surgió debido a que dicho cálculo implicaba el uso de *matrices* como principales herramientas matemáticas.

Poco más de un año después, Schrödinger publicó tres sorprendentes trabajos en los que llegaba a los mismos resultados utilizando lo que parecía ser un método de cálculo totalmente distinto: resolvió una ecuación muy semejante a la *ecuación de onda* de la física clásica, y dio así origen a una teoría que constituía una prolongación (aunque con radicales modificaciones) de las ideas de De Broglie; y a este complejo de teorías se le dio el nombre de mecánica ondulatoria. Debemos apresurarnos a hacer notar que las soluciones de la ecuación de Schrödinger son semejantes a ondas solamente para los sistemas físicos más sencillos, mientras que, en general, adoptan una forma bastante complicada que guarda poca semejanza con las ondas ordinarias del espacio. El nombre de "mecánica ondulatoria" no es, por consiguiente, muy descriptivo de lo que sucede en el tema que designa, y la tenaz adhesión a él por parte de algunos físicos ha introducido, tal vez, en una situación ya difícil un engañoso sesgo que impide una comprensión más profunda. Esperamos que esto resulte claro a medida que avance nuestra exposición.

Con los descubrimientos de Heisenberg y Schrödinger se dispuso de dos instrumentos, la mecánica de matrices y la mecánica de ondas, que realizaban de maneras distintas la misma función y lograban los mismos fines. Esta curiosa duplicidad, que violaba básicos principios metafísicos, desapareció con un notable y esclarecedor destello que per-

mitió ver de un solo golpe todo el nuevo territorio; pues se descubrió que el cálculo de ondas y el de matrices eran *isomorfos,* eran dos formas distintas del mismo conjunto fundamental de construcciones interpretativas, y el descubrimiento de esta equivalencia sacó a la luz tal estructura básica. Por lo demás, los cálculos isomórficos no son infrecuentes en las matemáticas; así, existe un conocido isomorfismo entre dos formas de geometría, la ordinaria y la analítica: la primera opera con puntos, líneas y ángulos, y la segunda con ejes de coordenadas y números, pero los teoremas de la geometría pueden ser demostrados en cualquiera de ambas formas.

DIRAC propuso luego una teoría lo bastante general como para reunir los métodos de HEISENBERG y de SCHRÖDINGER, teoría construida de tal modo que estos dos métodos aparecen como casos especiales suyos y a la que llamó cálculo de los números q (de "quantum"). El método de DIRAC, que en cierta medida carecía de rigor matemático, fue colocado sobre una base analítica técnicamente más firme por VON NEUMANN, quien demostró que los elementos del cálculo de matrices y los de la mecánica ondulatoria son formas especiales de "operadores en un espacio de HILBERT". Esta teoría general lleva ahora el nombre de *mecánica cuántica,* nombre más idóneo que ninguno de los otros porque es imparcial y no impone tributos a la intuición; vamos a adoptarlo nosotros.

Pero lo que queremos no es presentar el tema en su forma más general, como un álgebra en un espacio de HILBERT, sino que escogeremos la formulación especial que los físicos han encontrado más útil y que más a menudo emplean en su trabajo: es la teoría de SCHRÖDINGER, ampliada hasta incluir las importantes contribuciones de BORN y JORDAN, contribuciones que hicieron posible la interpretación estadística que en breve vamos a estudiar. Debe, sin embargo, darse cuenta el lector de que toda la exposición contenida en este capítulo y en el siguiente podría haber sido también escrita en un lenguaje completamente diferente, que utilizase matrices, e igualmente en otro que involucrase la aparición de puntos del espacio de HILBERT, en lugar de nuestras "funciones de estado"

17.2. OPERADORES, FUNCIONES PROPIAS Y VALORES PROPIOS

La mecánica cuántica hace uso de unas cuantas ideas nuevas que todavía no han penetrado en los cursos elementales de matemáticas y que, por consiguiente, hemos de repasar ahora; mas, aunque nos son poco familiares y quizá un poco intimidantes, por lo tanto, no son más difíciles de comprender que las nociones, más sencillas, del cálculo diferencial. Recordará el lector lo que es una *función* matemática: la ecuación $y=f(x)$, que se lee "y es función de x", asigna a cada valor de la variable independiente x un valor de la variable dependiente y. (Esta ecuación suele escribirse a menudo $y=y(x)$.) Tanto la variable dependiente como la independiente pueden adoptar otros nombres; así, $\psi(x)$

dice que ψ, la variable dependiente, es función de una independiente llamada x; $u(t)$ dice que u es una función de t, etc. Pero antes de que ninguno de estos símbolos tenga un significado concreto hay que dar la forma funcional de y, ψ, o u, esto es, debe especificarse que y es una función sinusoidal, por ejemplo, o que ψ es la elevación al cuadrado; y en tal caso, $y=y(x)$ se lee $y=\operatorname{sen} x$, así como $\psi=\psi(x)$ se convierte en $\psi=x^2$. En numerosas ocasiones puede resultar evidente por el contexto (o ser innecesario especificar por otras razones), que y es una función de x o que u es una función de t; pueden entonces escribirse los símbolos y y u en lugar de los explícitos $y(x)$ y $u(t)$.

Como paso siguiente, introducimos una noción menos usual, la de *operador*. Una función tal como $y(x)$ puede ser sometida a muchas operaciones matemáticas cuyo efecto consista en cambiarla en otra función, digamos en $w(x)$. Por ejemplo, podemos multiplicar $y(x)$ por 2, o por x; podemos dividirla por algún número, n, o por alguna otra función, $f(x)$; y cabe diferenciarla o entregarla con respecto a x. Estas operaciones que acabamos de describir con palabras se indican ordinariamente con símbolos corrientes; y así, las escribiremos sucesivamente del modo siguiente: $w=2y$, $w=xy$; $w=y/n$, $w=y/f(x)$, $w=dy/dx$, $w\int_0^x y\,dx$. Es conveniente ahora introducir un símbolo especial para la clase de tales operaciones cuando convierten una función $y(x)$ en alguna otra función $w(x)$. Ese símbolo es Q, y vamos a abreviar las anteriores ecuaciones en la única $w(x)=Qy(x)$. El símbolo Q y la construcción interpretativa que representa reciben el nombre de "operador".

Una clase muy importante de operador es el operador diferencial, d/dx; y si se identifica Q con él, la ecuación $w=Qy$ adopta la forma $w=dy/dx$. Otro operador diferencial es $Q=d^2/dx^2$, símbolo que denota la segunda derivada; por fin, un operador diferencial muy general es una combinación lineal de todas las derivadas

$$Q=a_0+a_1\frac{d}{dx}+a_2\frac{d^2}{dx^2}+\ \ldots,$$

en la que las cantidades a_0, a_1, a_2, ... son funciones de x. En adelante limitaremos nuestra atención a los operadores diferenciales de los órdenes primero (d/dx) y segundo (d^2/dx^2), esto es, a símbolos como el anterior Q, pero con a_3, a_4 y todas las a superiores iguales a cero. Y también tendremos ocasión de utilizar el sencillo operador de la multiplicación por x, que indicaremos con "$x\cdot$" cuando haya que escribirlo explícitamente.

Es evidente que los operadores no funcionan por sí solos; en efecto, un símbolo de operador tal como el Q es semejante a un verbo transitivo sin objeto (y este último lo proporciona la función sobre la que actúe el operador). Esto no significa, naturalmente, que el operador Q sólo se halle exento de *significado:* el operador "ver" significa algo, aunque su significado sea menos específico que "ver a Juan".

Sea Q un operador dado, y $\varphi(x)$ una función dada; la nueva función $Q\varphi$ queda entonces también definida. Es interesante ahora comparar $Q\varphi$ con φ: en general, ambas funciones serán enteramente diferentes, pero es concebible que tengan propiedades similares; podría incluso suceder que fueran idénticas, como sería el caso, por ejemplo, si φ fuese sen x y Q fuese $-d^2/dx^2$. El matemático lleva mucho tiempo fascinado por las situaciones en que φ y $Q\varphi$ son *proporcionales* entre sí; cuando sucede tal cosa, $Q\varphi$ es igual al producto de algún número (digamos q)[1] por φ, y la ecuación

$$Q\varphi = q\varphi \tag{17.1}$$

representa tal estado de cosas. Mas el problema no consiste, por lo regular, en encontrar un operador Q que satisfaga la ecuación *para una función dada* φ: la situación típica en la mecánica cuántica es *encontrar una* φ *que satisfaga la ecuación* (17.1) *cuando* Q *esté especificada.*

Así, supongamos que esté dado un operador Q pero que no se diga nada acerca de la función $\varphi(x)$. ¿Es posible elegir una función φ de modo que satisfaga la ecuación (17.1)? Para algunos operadores, en particular para los operadores diferenciales ya mencionados y para el operador $x\cdot$, la respuesta es afirmativa (los métodos por los que pueden encontrarse tales funciones son bien conocidos, y no es preciso que nos detengamos ahora a considerarlos). Esa función $\varphi(x)$, que satisface la ecuación (17.1) para un Q dado, en otras palabras, esa función $\varphi(x)$, que sometida a la operación Q se convierte en un múltiplo constante de su primitivo valor, la denominaremos para una mayor concreción, $\psi(x)$. Así, entre todas las funciones posibles $\varphi(x)$ a las que podría ser aplicado Q, existen algunas especiales, que aquí llamaremos $\psi(x)$, que satisfacen

$$Q\psi(x) = q\psi(x) \tag{17.2}$$

Lo que la constante q resulta ser no está en nuestra mano prefijarlo, en general.

La función ψ recibe el nombre de *autofunción* o *función propia* del operador Q, y el número q recibe el nombre de *autovalor* o *valor propio* de Q. En las secciones siguientes veremos algunos ejemplos de ecuaciones de valores propios y sus soluciones[2]. Es de destacar que el único

---

[1] Este símbolo q no representa un número cuántico.

[2] Para hacer desaparecer el misterio de la ecuación (17.2) consideremos en seguida un ejemplo. Si Q es el operador diferencial de segundo orden, d^2/dx^2, la ecuación es

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = q\psi$$

Se trata de una ecuación diferencial ordinaria, cuya solución, como de sobra se sabe, es

$$\psi = c_1 e^{\sqrt{q}x} + c_2 e^{-\sqrt{q}x}.$$

Esto representa una autofunción o función propia de d^2/dx^2. Observemos que q

símbolo que se conoce o preasigna en la ecuación (17.2) es el operador Q; y conociéndolo, puede uno generalmente construir: (a) un conjunto de valores de q, y (b) un conjunto de funciones ψ. No hay nada extraño en el hecho de que una cantidad matemática pueda crear, como si dijéramos, dos conjuntos de otras; estado de cosas que expresaremos diciendo: un operador *engendra* un conjunto de valores propios y un conjunto de funciones propias (cada una de estas últimas estará asociada, o pertenecerá, a un valor propio específico).

17.3. Axioma 1. Observables y operadores

Hemos visto en los capítulos IX a XI cómo procede toda disciplina científica exacta: define sus sistemas, elige observables para estos sistemas y reúne un conjunto significativo de tales observables en estados (las leyes de la disciplina regulan o restringen la elección de estados). En la mecánica clásica todo esto es relativamente sencillo, pues sus sistemas son del tipo representable, y sus observables de la variedad ordinaria, poseída. Así, la posición de una masa es una magnitud poseída unívocamente en cada instante, y cabe representarla mediante un número; y puesto que cambia, debe permitírsele cambiar al número: el observable posición, por ejemplo, se convierte en una función del tiempo, o de otras variables que cambien con el tiempo. Evidentemente, entonces, la *función* matemática es la construcción interpretativa que más o menos obviamente corresponde a un observable ordinario (poseído). Por eso es por lo que, en la mecánica clásica, la *función* $x(t)$ corresponde a la posición, la *función* $m \cdot v(t)$ al impulso, ímpetu o cantidad de movimiento, la *función* $\frac{1}{2}mv^2$ a la energía cinética de una partícula, etc. Cada una de ellas *tiene* un valor específico en un instante dado.

Si bien se considera de ordinario que los sistemas de la mecánica cuántica (electrones, protones, fotones, átomos, núcleos) participan de los atributos intuibles de la mecánica en general, no los poseen realmente, como sabemos ahora. Cierto que propiedades tales como posición, impulso y energía son observables con respecto a estos sistemas, pero no son *unívocamente* observables en un solo acto de mirar: son lo que anteriormente hemos denominado observables latentes, observables pertinentes para el sistema, desde luego, pero que no se manifiestan tan directa y consecuentemente como los observables poseídos. Recuérdese al electrón, que, cuando se utilizaban métodos clásicos para describir su movimiento, cometía la atrocidad de atravesar ambos agujeros a la vez: era absurdo hablar de su posición en un único paso a través de un agu-

---

puede tener cualquier valor que queramos darle (aunque, como se verá más adelante, esto no siempre es verdad); podemos decir, por lo tanto, que los autovalores o valores propios de este operador son *ilimitados* o, como también se pondrá de manifiesto más adelante, *no cuantizados*. Nótese, no obstante, que la función propia ψ depende paramétricamente de q; así, pues, para ser más definidos debemos indicar explícitamente esta dependencia y escribir $\psi_q(x)$ en lugar de ψ.

jero; mas si por esa razón abandonáramos la idea de que el electrón se encuentra en el espacio, ignoraríamos algo muy valioso, a saber, el hecho de que, después de todo, había una gráfica observable en la pantalla. De este modo, el electrón, si bien conservando en un sentido más laxo la existencia espacial, manifiesta el carácter latente del observable posición: este observable es ahora algo que puede tener diferentes valores en distintas observaciones, pero sigue teniendo suficiente estabilidad interna como para dar origen a un colectivo único de valores en una serie de observaciones. Un observable latente se dispersa[3] cuando se lo observa repetidamente, pero tiene una distribución probabilística determinable; y la mecánica cuántica se diferencia de la física clásica en que se ve obligada a ocuparse de observables latentes.

Hemos visto que las funciones son satisfactorias cuando hay que ocuparse de magnitudes ordinarias. ¿Qué construcción matemática es adecuada para servir en el tratamiento de los observables latentes? Puesto que toda observación produce un número, el objeto de nuestra investigación debe producir también números, mas no es preciso que sea esa disposición seriada de números que denominamos función. Ahora bien, hemos visto que un operador, que no es una función, engendra números llamados valores propios; formalmente, pues, se pone de manifiesto la adecuación de los operadores para representar observables latentes; y la mecánica cuántica ha aprovechado esta situación, convirtiendo tal posibilidad en un tremendo éxito.

En lo sucesivo vamos a abandonar el razonamiento secuencial y a presentar las bases de esta ciencia de forma axiomática[4], toda vez que hemos despejado ya el camino para tal exposición.

El primer axioma dice: *A cada observable corresponde un operador.*

Es tarea de la ciencia hacer una detallada asignación de operadores a los observables, lo cual, naturalmente, no puede realizarse utilizando solamente el presente axioma, sino que requiere para conseguirlo toda la teoría que se presenta a continuación. Conviene, no obstante, indicar en seguida, antes de llegar a ulteriores desarrollos, qué son algunos de estos operadores, que parecerán extraños en este punto y provocarán en el lector, sin duda, un fuerte deseo de saber de dónde proceden. Pero aquí nos limitaremos simplemente a decir que se los postula inicialmente de la misma forma que se hace con las funciones en otras ramas más antiguas de la física, y que luego se verifican de manera muy semejante; porque, después de todo, ¿de dónde nos viene el saber que la energía cinética es igual a $\frac{1}{2}mv^2$, sino de una postulación y una subsiguiente verificación?

---

[3] Veremos más adelante que existen condiciones especiales (autoestados o estados propios) en las cuales incluso un observable latente da lugar al mismo valor en observaciones repetidas. Esto, naturalmente, no es más sorprendente que el que las probabilidades puedan asumir el valor límite 1.

[4] La palabra *axioma* se utiliza aquí en un sentido más bien general, refiriéndose a cualquier proposición teórica de contenido físico o matemático que no pueda ser extraída de otras proposiciones. (El uso que vamos a hacer de esta palabra puede en ocasiones desagradar al lógico experto.)

Habrá tres observables de particular interés: son los que se enumeran en la tabla 17.1, juntamente con los operadores que les corresponden y con los símbolos que utilizaremos como abreviaturas de estos últimos. La última columna contiene las habituales funciones clásicas utilizadas para los observables de la mecánica ordinaria.

TABLA 17.1

Observable	Operador	Símbolo	Función habitual
Posición	$x \cdot$	X	x
Impulso, ímpetu o momento	$-ik\dfrac{d}{dx}$	P	$m\dfrac{dx}{dt}$
Energía cinética	$-\dfrac{k^2}{2m}\dfrac{d^2}{dx^2}$	H	$\frac{1}{2}m\left(\dfrac{dx}{dt}\right)^2$

La constante k que aparece en los operadores de energía y momento es la constante de PLANCK, h, dividida por 2π; y m es la masa del sistema en movimiento. La teoría que estamos presentando es aplicable a todas las entidades que ordinariamente se consideran como partículas (electrones, protones, átomos en movimiento, moléculas y piedras), pero vamos a centrar por el momento la atención en los *electrones*. En lo que sigue, m designará, por lo tanto, la masa de un electrón. La aparición de i, que es igual a $\sqrt{-1}$, tal vez resulte inesperada aquí pero no dará origen a dificultades: en realidad, su presencia es un alivio para el matemático, pues sin él el operador correspondiente al momento no tendría las propiedades formales que le harían útil. (No sería "hermético", por lo que no siempre poseería valores propios reales.)

Al llegar a este punto nos enfrentamos con la siguiente cuestión: ¿Son todos los observables del microcosmos del tipo latente? La respuesta revela una extraña asimetría en la actual teoría de los *cuantos*, y sugiere la existencia de un defecto, si bien es probable que lleguen a eliminarlo futuros avances de la teoría; porque la contestación es que existen *algunos* observables, incluyendo los especificados anteriormente, que son latentes, y otros que no lo son, aunque no puede darse ninguna buena razón de esta diferencia. La carga y la masa de un electrón pertenecen a esta última clase; y frecuentemente se los considera no como auténticos observables, sino como parámetros que aparecen en las ecuaciones de la mecánica cuántica; pero esta manera de hablar no altera la situación filosófica: carga y masa de un electrón son observables en el mismo sentido que energía y espín (o giro), y la división es insatisfactoria. Yo creo probable que una futura teoría cuántica tratará todos los observables como normalmente latentes.

17.4. Axioma 2. Estados y funciones

En la mecánica clásica un estado es una colección de valores para un número suficiente de observables; por ejemplo, la posición y el impulso cuando el sistema sea una partícula o punto material. Puesto que en la nueva teoría estos observables no "tienen" valores, se hace preciso volver a definir el estado.

Esto puede hacerse de dos formas equivalentes entre sí. La primera representa una desviación mínima de los métodos clásicos, pero es un poco difícil de abordar; y como quiera que no vamos a adoptarla, nos basta con mencionarla para que la exposición sea completa. Sucede que, cuando un sistema está en una situación dada, existen siempre *algunos* observables que *dan lugar* en mediciones repetidas a valores coherentes entre sí, y que, por consiguiente, no son latentes en ese particular estado del sistema, aunque todos los demás observables lo sean. De ahora en adelante nos vamos a referir a tales observables normalmente latentes, pero que, sin embargo, en un estado especial ostentan valores únicos, como *poseedores de valores claros,* o, simplemente, observables claros. Ahora bien, un estado puede quedar definido enumerando todos los observables que sean claros y especificando luego sus valores; este es el primer método a que nos referíamos. Como ya hemos dicho, es en todo equivalente a otro, de mayor alcance en cuanto a aplicaciones y que, aunque más abstracto, es más fácil de comprender, sin embargo, porque está íntimamente relacionado con la actitud filosófica básica de la mecánica cuántica.

El segundo método se basa en el axioma 2, que dice:

A cada estado de un sistema físico corresponde una función llamada función de estado, $\varphi(x)$.

Para que este axioma tenga sentido debe uno poder predecir con su uso los resultados estadísticos de las observaciones acerca de todos los observables posibles que ofrezca el sistema, y predecirlos a partir de un conocimiento de $\varphi(x)$. Dicho de otro modo, $\varphi(x)$ tiene que poseer la clave de todo lo que pueda ser conocido empíricamente (esto es, realizando mediciones) en cuanto al sistema que se halle en ese estado; y los siguientes axiomas demostrarán que así sucede, verdaderamente. El axioma 2 establece una *regla de correspondencia* entre un estado parcial y φ, pero no completa la cadena de significados, ya que deja a $\varphi(x)$ sin significado en este punto, al no indicar cómo ha de quedar confirmado φ; y también es preciso llenar este vacío.

Igualmente vago es en esta etapa el símbolo x, la variable independiente que aparece como argumento de la función de estado. Como veremos, su interpretación realmente no importa, pero es conveniente tomarla como una coordenada de posición en el sentido habitual y entender φ como una curva construida sobre el eje x. En general, φ tiene más variables que una, de hecho, tantas cuantos grados de libertad tenga el

sistema al considerarlo al modo clásico; pero vamos a elegir ejemplos que nos permitan continuar con una única variable x.

Los dos primeros axiomas establecen una especie de medio formal, creado por sus perspectivas de éxito al describir la situación epistemológica de la experiencia atómica, pero exento de contenido material; y éste lo proporcionan los axiomas 3 y 4.

17.5. Axioma 3. El significado empírico de los valores propios

En la mecánica clásica se daba por supuesto sin discusión que todos los valores de un observable físico son intrínsecamente posibles: una partícula material podría encontrarse en cualquier parte, con cualquier impulso ($-\infty<p<\infty$) y, por consiguiente, con cualquier energía. Había, desde luego, una pequeña restricción: la energía cinética no podía asumir valores negativos; pero esto quedaba automáticamente garantizado por su fórmula, que sólo contiene cantidades positivas. Los sistemas atómicos, sin embargo, muestran el fenómeno de la cuantización: ejercen una peculiar selectividad con respecto a los valores que ciertos observables, notablemente la energía, pueden asumir. La mecánica cuántica explica esta contingencia de una forma bella y natural por medio de su tercer axioma, que dice:

Los únicos valores que pueden encontrarse en la medición de un observable son los valores propios de su operador.

Veamos lo que este postulado implica con respecto a los valores permitidos, o mensurables, de los tres observables incluidos en la tabla 17.1. (Ofrece ciertas ventajas empezar por el final de esa lista y considerar primero el observable de la energía.) Si se utiliza el símbolo E para denotar los valores propios del operador H, la ecuación a resolver es $H\psi=E\psi$, o, explícitamente,

$$-\frac{k^2}{2m}\frac{d^2\psi}{dx^2}=E\psi. \tag{17.3}$$

Su solución es perfectamente conocida desde el primer curso de cálculo o de física: es una ecuación formalmente idéntica a la que en la física clásica describe el movimiento de un sencillo oscilador armónico, o sea,

$$-M\frac{d^2y}{dt^2}=Ky, \tag{17.4}$$

siendo

$$K=\text{ constante }>0.$$

Puesto que la ecuación (17.4) posee la solución $y=c$ sean $(\sqrt{(K/M)t+\delta})$, siendo c y δ constantes de integración, la ecuación (17.3) debe dar

$$\psi_E = c \operatorname{sen}\left(\frac{\sqrt{2mE}}{k}x+\delta\right). \tag{17.5}$$

Toda función de esta forma es una función propia de H, independientemente del valor de E. Conviene advertir que para *todo* E puede construirse una función propia correspondiente, ψ; por ello, todo valor de E es un valor propio de H y, por consiguiente, está permitido: falta la cuantización en este caso. Este resultado se halla de acuerdo con la observación: un electrón *libre* (que es lo que nuestra teoría está ahora caracterizando) puede poseer cualquier valor de E [5].

El resultado es completamente distinto, sin embargo, cuando la partícula no es libre. Supongamos que esté confinada a un intervalo de longitud l, de modo que $0 \leqslant x \leqslant l$. La transcripción mecánico-cuantista de esta condición es que el sistema no posea ningún estado fuera de estos límites para x, esto es, que ψ_E sea despreciable fuera del intervalo; analíticamente, ello solamente puede ocurrir haciendo que ψ_E sea cero en $x=0$ y en $x=l$. Mas en estas circunstancias, la ecuación (17.5) es todavía una solución de (17.3), pero no satisface tales condiciones en los límites; para reforzarlas es preciso asignar valores especiales a los parámetros δ y E.

Evidentemente, para que $\psi_E(0)$ se anule, δ tiene que ser igual a cero; segundo, si $\psi_E(l)=0$, debemos hacer $\sqrt{2mE}\ l/k=n\pi$, siendo n un entero, pues solamente sen $n\pi$ es cero para todo n; pero ahora vemos cómo surge la cuantización, pues al despejar E de la última relación queda

$$E = n^2 \frac{\pi^2 k^2}{2ml^2}. \tag{17.6}$$

Así, pues, sólo se predicen (y se descubre que realmente se presentan) valores discretos de E, a saber, $\pi^2k^2/2ml^2$, $4(\pi^2k^2/2ml^2)$, $9(\pi^2k^2/2ml^2)$, etcétera. Los valores sucesivos de E se denominan *niveles de energía.*

¿Por qué la cuantización ha eludido al científico hasta tiempos tan recientes? La ecuación (17.6) contiene la contestación: sólo si $\pi^2k^2/2m$ es suficientemente grande, esto es, si m es suficientemente pequeño, es apreciable la separación entre niveles sucesivos de energía. Para masas ordinarias, m es tan grande que la cuantización pasaba inadvertida; mas para masas atómicas, sobre todo para el electrón, con su m igual a 10^{-29} gramos, la separación entre niveles se hizo evidente y de magnitud muy importante.

---

[5] Existe, naturalmente, la condición trivial de que $E \geqslant 0$, de acuerdo con la física clásica.

Habiendo tratado ya de H, consideremos ahora el operador P. La ecuación de sus valores propios es

$$-ik\frac{d\psi}{dx}=p\psi \tag{17.7}$$

supuesto que utilicemos el símbolo p para tales autovalores. La ecuación (17.7) es inmediatamente integrable, y tiene la solución [6]

$$\psi=ce^{ipx/k}. \tag{17.8}$$

Esta solución es adecuada para todos los valores reales de p, ya sean positivos o negativos, de donde concluimos que las mediciones del impulso de una partícula libre pueden dar todos los valores posibles, sin revelar ninguna cuantización; y los experimentos confirman este hecho Igualmente, a todo valor propio p le está asociada una función propia, a saber, la dada por la ecuación (17.8), a la que en lo sucesivo designaremos con ψ_p, para evitar confusiones con las funciones propias pertenecientes a otros operadores.

Examinemos, finalmente, el operador X. Nos conduce a un álgebra algo insólida, pero muy sencilla. Vamos a denominar a a los valores propios de X, que representan la posición de la partícula (posición medida respecto a algún origen). La tabla I muestra que hemos de resolver

$$x\cdot\psi=a\psi, \tag{17.9}$$

sencilla ecuación que, al parecer, tiene la solución $x=a$. Pero no cometamos el pecado cardinal del álgebra, la división por cero: no podemos cancelar ψ en la ecuación (17.9) cuando ψ sea cero, y muy bien puede ser cero para ciertos valores de x. Procediendo más cuidadosamente, pues, escribimos la ecuación en la siguiente forma:

$$(x-a)\psi=0$$

y la interpretamos como sigue: uno de los factores del primer miembro debe ser cero; por ello, o $x=a$, o $\psi=0$. Vemos así que la función $\psi(x)$ es cero en todo punto excepto en el $x=a$, donde puede tener cualquier valor sin dejar de satisfacer esta ecuación. Rigurosamente hablando, ψ no es una función, en absoluto, pero cabe aproximarse a ella lo suficiente por cierta función, representada en la Figura 17.1, que es cero en todos los puntos excepto en la vecindad inmediata de a, punto en que asume valores muy grandes. DIRAC ha introducido para ella el nombre de *función delta,* y su abreviatura usual es $\delta(x, a)$. Observamos, por tanto, que la función propia del operador X perteneciente al valor propio a es

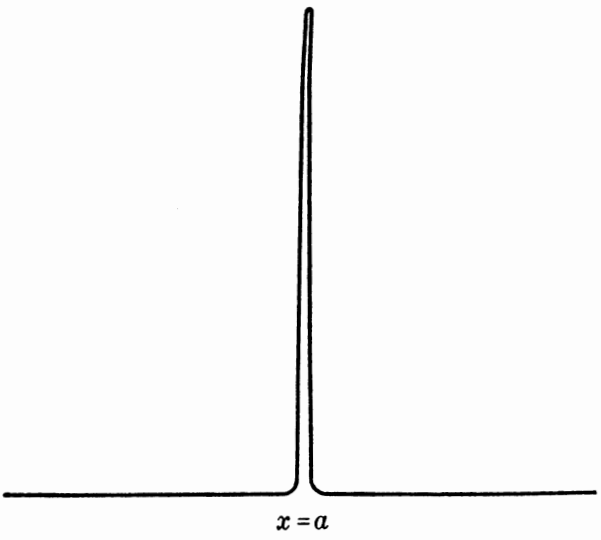
$$\psi_a=\delta(x, a). \tag{17.10}$$

De nuevo falta la cuantización, ya que la ecuación (17.9) permite todos

[6] Mediante el símbolo c representamos en este capítulo una constante, pero no la misma constante en distintas ecuaciones.

los valores de a. Resumiendo, hemos visto que, para la partícula [7] libre, no sujeta a restricciones, ninguno de los tres observables aquí considerados posee valores cuantizados, si bien esto no implica un comportamiento clásico en todos los demás aspectos; en particular, no altera el carácter latente de tales observables.

La cuantización se presenta en muchos otros casos, como ocurría en el ejemplo de nuestro electrón obligado a no salir de un intervalo fini-



Función-δ de Dirac, $\delta(x,a)$

Figura 17.1

to, l. Físicamente, los ejemplos de cuantización son mucho más interesantes que los sencillos casos tratados hasta ahora, y por lo general se les considera característicos de la nueva disciplina, a la que han dado nombre; veremos, sin embargo, que en un sentido más profundo la cuantización es, simplemente, un subproducto de un nuevo método básico para describir la experiencia física. Los sistemas físicos más conocidos que presentan energías cuantizadas son el oscilador armónico sencillo, el rotador y todos los átomos, moléculas y cristales; además, todos los momentos angulares tienen valores cuantizados; y si no los consideramos aquí es porque aportan poco a las cuestiones fundamentales de que se trata, mientras que los resultados expresados más arriba son necesarios para nuestros futuros estudios.

Al obtener los *valores propios* de la energía, el impulso y la posición de un electrón libre era necesario encontrar también las *funciones pro-*

[7] Comprendemos ahora, naturalmente, que la palabra *partícula* no tiene ya su estrecho significado mecanicista.

pias correspondientes; su significado es todavía oscuro en este punto, ya que nos lo proporcionará el siguiente axioma de nuestra lista. Mas para poder hacer uso rápidamente de toda la información disponible la vamos a reunir en la tabla 17.2.

TABLA 17.2

Observable	Valor propio o autovalor	Función propia o autofunción
Posición	a, no cuantizado	$\Psi_a=\delta(x, a)$
Impulso	p, no cuantizado	$\Psi_p=ce^{ipx/k}$
Energía	E, no cuantizado	$\psi_E=c\left(\operatorname{sen}\dfrac{\sqrt{2mE}}{k}x+\delta\right)$

17.6. AXIOMA 4. EL SIGNIFICADO EMPÍRICO DE LOS ESTADOS Y DE LOS ESTADOS PROPIOS

Supongamos que se nos dé un sistema, por ejemplo, un electrón, y que sepamos que se encuentra en un estado $\varphi(x)$. ¿Qué podemos concluir respecto a su comportamiento? Conviene primero aclarar el significado del término *comportamiento,* que es aquí menos obvio que para sistemas que presenten unos observables nítidos poseídos; por decirlo en forma resumida: *el comportamiento de un sistema atómico es la totalidad de sus reacciones a operaciones físicas.* Pero las operaciones físicas destinadas a provocar reacciones cuantitativas se denominan mediciones; en consecuencia, la anterior pregunta puede formularse de la siguiente manera: ¿qué pueden revelar las mediciones respecto a un sistema que se encuentre en el estado $\varphi(x)$?

Desde el punto de vista ahora fijado, un observable no es tanto un atributo del sistema como una entidad determinada por la operación física que se haya de realizar: la energía, por ejemplo, no es algo que el sistema contenga, sino algo provocado o—si se quiere llevar esta concepción hasta el límite—algo que emerge en el acto de exponer el sistema a un grupo previsto de circunstancias. Una vez esto comprendido, la naturaleza latente de los observables y su dispersión de valores en la medición dejan de ser paradójicas. El lector podrá ver ahora más claramente por qué el físico moderno no puede ya sostener un realismo simple y por qué se requiere la complicada epistemología de este libro.

Puesto que la medición no fija con certeza el valor de un observable (si la medición se repitiese cuando el sistema se encontrase exactamente en el mismo estado no debería esperarse el mismo resultado), solamente

puede establecerse una probabilidad. Supongamos ahora que el operador correspondiente al observable que se vaya a medir sea Q y que sus valores propios sean q; queremos saber cuál será la probabilidad $W(q)$ de que, cuando se realice la medición, el resultado sea q, hallándose el sistema en el estado $\varphi(x)$. El cuarto axioma suministra esta información; dicho axioma dice:

Sea $\psi_q(x)$ la función propia perteneciente al valor propio q de Q. Compútese

$$b(q)=\int_{-\infty}^{+\infty}\varphi(x)\psi_q(x)dx. \tag{17.11}$$

la probabilidad será, entonces,

$$W(q)=b^2(q). \tag{17.12}$$

Esto tiene un aspecto realmente complicado, y da la impresión de parecerse a una receta de libro de cocina. Sin embargo, es una regla natural y muy elegante cuando se la considera como un teorema referente al espacio de HILBERT[8].

Antes de aplicar el axioma es preciso decir unas palabras respecto a $W(q)$. ¿En qué sentido es una probabilidad? ¿Cuál es el agregado y cuáles son sus elementos? Sucede que la mecánica cuántica trata fructuosamente con dos clases de agregados. El primero está formado por mediciones repetidas del *mismo* sistema, preparado siempre de modo similar antes de la observación, con el fin de que pueda suponerse sin peligro de error que se encuentra en el mismo estado, $\varphi(x)$[9]; la segunda clase de agregado se compone de un gran número de observaciones simultáneas sobre una serie de sistemas análogos, todos los cuales se encuentran en el mismo estado. El último tipo de agregado es más frecuente

---

[8] Las ecuaciones (17.11) y (17.12) no son completamente generales, y más adelante las necesitaremos en su forma general. Los detalles que vamos a añadir ahora no deben incomodar al lector que aborrezca las funciones complejas, pues no alteran la lógica de nuestra exposición. Las funciones φ y ψ_q pueden, en efecto, ser complejas; cuando es éste el caso, la ecuación (17.11) puede reemplazarse por

$$b(q)=\int \varphi^*(x)\psi_q(x)\,dx \tag{17.11'}$$

y la ecuación (17.12) por

$$W(q)=b^*(q)b(q) \tag{17.12'}$$

(el asterisco denota la función compleja conjugada). El lector matemático se dará cuenta de que (17.12') es necesaria para que la probabilidad sea *real*; y (17.11') se precisa por razones de coherencia.

[9] Es cuestión frecuentemente discutida la de que se pueda llegar a estar seguro alguna vez de que se ha preparado el mismo estado. Véase J. VON NEUMANN: *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, Berlín, Springer-Verlag 1932 [vers. cast.: *Fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica*, Madrid C.S.I.C., 1949); A. E. RUARK: *Phys. Rev.*, 48:466 (1935); E. SCHRÖDINGER: *Proc. Camb. Phil. Soc.*, 31:55 (1935); H. MARGENEAU: *Phil. Sci.*, 4:337 (1937), y otras referencias dadas en la última cita.

de encontrar porque es más fácil de producir, ya que casi todas las observaciones sobre sistemas atómicos implican numerosos ejemplares; debe ponerse de relieve, sin embargo, que la primera clase de *colectivo* es igualmente adecuada y que los rasgos probabilitarios no se introducen en la mecánica cuántica por la interacción de muchos ejemplares, como sucede en la mecánica estadística. (Al llegar a este punto debería recordarse la difracción de electrones obtenida mediante orificios de una pantalla, que estudiamos al final del capítulo anterior.)

Para dejar más claras y concretas la trascendencia y utilidad del axioma 4, lo vamos a aplicar a los tres operadores que hemos elegido para estudio. El sistema será una partícula libre en el estado $\varphi(x)$. ¿Cuál es la probabilidad $W(a)$ de que lo encontremos en el punto $x=a$? Al observable posición corresponde el operador X; y, de acuerdo con la tabla 17.2, sus funciones propias ψ_a son $\delta(x, a)$; por consiguiente,

$$b(a)=\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x)\delta(x, a)\, dx.$$

Debido a las sencillas propiedades de la función delta, la evaluación de esta integral es sumamente fácil: el integrando es cero en todos los puntos, excepto en $x=a$, punto en el que $\varphi(x)$ tiene el valor $\varphi(a)$ y $\delta(x, a)$ posee cierto valor constante; en consecuencia, $b(a)$ es simplemente $c\varphi(a)$ [10], y utilizando la ecuación (17.12) encontramos para la probabilidad,

$$W(a)=\mathrm{C^{te.}}\,[\varphi(a)]^2, \tag{17.13}$$

resultado que es sumamente importante. En efecto, dice que *la función de estado $\varphi(x)$, después de ser elevada al cuadrado, representa la probabilidad de encontrar la partícula en el punto indicado por su argumento.* De este modo obtenemos una útil imagen del significado de la función de estado; pues una vez dada $\varphi(x)$, sabemos inmediatamente

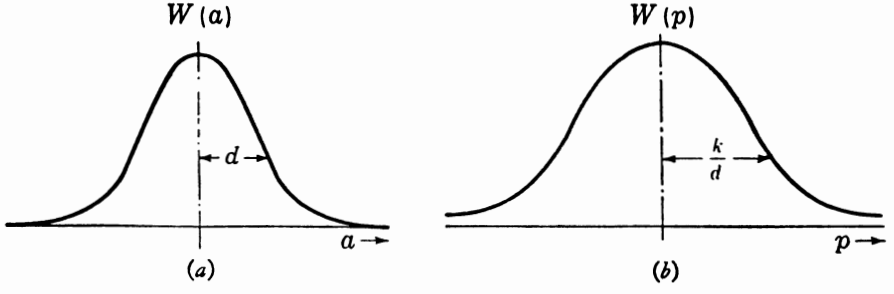


Figura 17.2

[10] La cantidad b se denomina a menudo "amplitud de probabilidad".

que $[\varphi(x)]^2$ es proporcional a la probabilidad de que la partícula esté "situada" [11] en x. En algunos de los tratamientos más sencillos del tema se hace explícita esta interpretación de la función de estado mediante un axioma especial; pero, como muestra la presente deducción, no es sino un subcaso del axioma 4.

No se gana nada procediendo con toda generalidad al estudiar las mediciones del impulso. Supongamos, por tanto, que el estado $\varphi(x)$ tiene una forma especial, la función de GAUSS, que, según sucede, es fácil de tratar y los resultados obtenidos valiéndose de ella son de fácil interpretación, pues conducen directamente al principio de incertidumbre; de ahí que tomemos

$$\varphi(x) = e^{-\frac{1}{2}(x/d)^2} \tag{17.14}$$

Este estado corresponde a una distribución de probabilidad $W(a) = ce^{-(a/d)^2}$, que se representa en la figura 17.2*a*; en ella hemos indicado la magnitud d, que es una medida de la anchura de la distribución (representa la mitad del ancho de la curva a un e-ésimo de su ordenada máxima); y, como puede verse, d es también una medida de la incertidumbre en la posición que es inherente al estado $\varphi(x)$. A riesgo de aburrir al lector con repeticiones, recalcamos una vez más que la curva de la figura 17.2*a* presenta los resultados estadísticos de las mediciones de la posición de una partícula en el estado $\varphi(x)$ tal y como los ofrece (17.14): la mayoría de las mediciones dan $a \cong 0$; las otras se distribuyen simétricamente en torno a este valor.

Ahora nos preguntamos por los resultados obtenidos, o previsibles, cuando el *impulso* o *momento* de la partícula se mida mientras ésta se encuentre precisamente en el estado φ dado por la ecuación (17.14). Buscando la función propia, ψ_p, en la tabla 17.2 y utilizándola en la ecuación (17.11), calculamos

$$b(p) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}(x/d)^2} \cdot ce^{ipx/k}\, dx.$$

Pero en las tablas de integrales encuentra uno la siguiente fórmula:

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\lambda x^2 + i\mu x}\, dx = \sqrt{\frac{\pi}{\lambda}}\, e^{-(\mu^2/4\lambda)}.$$

Así, pues, identificando las constantes, vemos que

$$b(p) = \text{C}^{\text{te}}.\ e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{d}{k}p\right)^2}$$

[11] Aquí y en otros lugares utilizamos un término que, en su interpretación común, contradice lo que se ha dicho acerca del carácter latente de la posición de la partícula. Los físicos continúan empleando así palabras "clásicas" en un nuevo enfoque, prefiriendo el peligro de mala interpretación de lo que dicen al laborioso lenguaje que necesitarían para lograr una expresión exacta.

y, por la ecuación (17.12),

$$W(p)=ce^{-\left(\frac{d}{k}p\right)^2} \tag{17.15}$$

Esta fórmula representa la probabilidad de medir un impulso especificado, p, y se representa en la figura 17.2*b*, en la que también se indica la anchura de la distribución, k/d; vemos que los valores medidos se distribuyen simétricamente en torno al punto $p=0$, que es el más probable de todos.

El hecho de que una curva gaussiana para a produzca también una curva gaussiana para p es accidental, pero muy útil, puesto que permite que el ancho de las curvas, esto es, la respectiva incertidumbre, se exprese de forma semejante en ambas distribuciones. En general, sin embargo, $W(p)$ no tiene la misma forma matemática que $W(a)$, pese a lo cual las dos están siempre correlacionadas en forma unívoca, de la que tenemos un ejemplo en las ecuaciones que acabamos de obtener (sobre las que habrá ocasión más adelante de volver, para seguir estudiándolas, por muy importantes razones: véase la sección 18.1).

Para completar la tarea en que nos hallamos empeñados es preciso considerar el observable energía; y por ello nos queda aún el problema de calcular $W(E)$ de conformidad con las ecuaciones (17.11) y (17.12) cuando $\varphi(x)$ esté dado por (17.14). Sin embargo, su solución no nos enseñará nada nuevo: $W(E)$ tiene una forma de campana muy similar a la figura 17.2*b*. Reservamos, por tanto, su cálculo como ejercicio para el lector interesado por ello.

Se ha ido manifestando ahora gradualmente el significado empírico de un estado arbitrario, $\varphi(x)$, aunque de una forma abstracta y quizá algo insólita. Pero, ¿qué son los llamados *estados propios* que entraban en escena a cada instante?; ¿tienen alguna significación física especial, o son simplemente instrumentos para el cálculo de las probabilidades que se necesitan en la ecuación (17.11)? Vamos a ver ahora que poseen un significado muy notable, que saltará a la vista al aplicar el axioma 4 a un estado $\varphi(x)$, elegido de tal modo que sea un estado propio.

Supongamos, pues, por poner un ejemplo, que $\varphi(x)=\psi_{q'}(x)$. (Es necesario añadir ahora un apóstrofo al símbolo q para indicar que hacemos referencia a un valor especial, único, de q, valor que llamamos q' y al que corresponderá la función $\psi_{q'}$. Según la ecuación (17.11),

$$b(q)=\int_{-\infty}^{\infty}\psi_{q'}(x)\psi_q(x)\,dx.$$

Esta integral no puede evaluarse por medios elementales, pero, según un teorema fundamental de análisis (que no hemos de demostrar aquí), lleva al extraño pero sencillo resultado siguiente: es cero siempre que q sea diferente de q'; y cuando $q=q'$ la integral tiene el valor 1.

Como el cuadrado de 0 es 0 y el cuadrado de 1 es 1, $W(q)$ es idéntico a $b(q)$. Por consiguiente,

$$W(q) = \begin{cases} 0, \text{ si } q \neq q' \\ 1, \text{ si } q = q'. \end{cases}$$

Expresándolo con palabras: si el sistema se encuentra en cierto estado propio del operador Q, a saber, en el estado propio correspondiente al valor propio q', la probabilidad de encontrar para q el valor particular q' es la unidad, y la probabilidad de no encontrar ese valor por la observación es cero. De esta manera los estados propios resultan ser unos estados en los que hay *algún* observable que no sufre dispersión, estados en los que un observable normalmente latente queda *poseído* y actúa como una magnitud ordinaria de la física clásica; y, como veremos, el estado propio es claro con respecto a tal observable [12].

El estado propio $\psi_a(x)$ de la ecuación (17.10) presenta muy claramente ese carácter: la función delta representada en la figura 17.1 muestra que, sin duda alguna, encontraremos la partícula en $x=a$.

Tal vez no esté de más en este punto resumir la información, más bien extensa, que hemos extraído del axioma 4, y que es la siguiente:

a. El cuadrado de la función de estado, $\varphi(x)$, representa siempre la probabilidad de encontrar [13] la partícula en x cuando se realice una medición de posición.

b. A partir de la distribución en cuanto a posición [más exactamente, a partir de $\varphi(x)$] pueden hallarse por procedimientos analíticos [(ecuaciones (17.11) y (17.12)] las distribuciones de probabilidad que caractericen los resultados medidos de todos los demás observables.

c. Un estado propio de un operador es un estado que no entraña dispersión alguna de las mediciones realizadas del observable perteneciente a ese operador: al repetirse ese tipo de medición se presentará siempre uno y el mismo valor, mientras perdure ese estado propio.

17.7. Generalizaciones

Por lo que se refiere a la estructura lógica de la mecánica cuántica, las exposiciones precedentes han sido muy generales. Hemos efectuado, sin embargo, algunas restricciones al aplicar los cuatro axiomas, y es conveniente indicar ahora, en una valoración final, dónde ha quedado sacrificada la generalidad.

---

[12] En general, cuando los estados son funciones de más de una variable x, cada estado propio es claro con respecto a varios observables.

[13] Véase la nota 11 de este mismo capítulo.

En primer lugar, hemos llevado a cabo el análisis con referencia a tres observables solamente. La mecánica cuántica conoce y utiliza unos operadores perfectamente establecidos para seis observables distintos, por más que algunos de ellos sean de una forma bastante desacostumbrada. El método fundamental de la mecánica cuántica, tal como resulta de los cuatro axiomas anteriores, ha sido llevado con cierto éxito a campos diferentes del de la mecánica; pero la cuestión referente a la representación de ciertos observables, tales como las intensidades de los campos eléctricos y magnéticos de la electrodinámica, todavía no ha recibido una respuesta enteramente satisfactoria.

Se ha planteado a veces la cuestión inversa, o sea, la de si existe un observable físico para todo operador matemático concebible; pero esa cuestión es apenas más interesante que su contrapartida clásica, que tendrá una forma tal como la siguiente: ¿define una magnitud física toda función matemática concebible de las variables dinámicas? La mejor respuesta es que, en efecto, la define; pero que esa magnitutd puede carecer de interés científico. Por ejemplo, la combinación de variables $mx^{3/2}$ es ciertamente una magnitud física con sentido, que posee valores definidos en instantes definidos y, si a eso vamos, que es real; sin embargo, el físico no la ha dignificado dándole un nombre, en evidente oposición a la magnitud $1/2\ mv^2$, que él llama energía cinética. La razón es la intrascendencia de la magnitud $mx^{3/2}$ en el sistema de construcciones interpretativas que tiene establecido.

La cuestión referente al significado físico de un operador matemático arbitrariamente formado tiene una respuesta análoga.

En cuanto a los *sistemas,* su variedad es realmente enorme. Nuestras aplicaciones se limitaban al más simple, el punto material libre, ejemplificado por el electrón libre. El electrón puede, sin embargo, estar ligado a otras partículas por fuerzas, como ocurre en los átomos y en las moléculas; en tales casos, los operadores X y P permanecen invariables y sus valores mensurables siguen sin estar cuantizados; pero la energía se compondrá de dos partes, la energía cinética, anteriormente denotada por H, y un término adicional para la energía potencial. Asimismo, si al movimiento de la partícula no se le han impuesto restricciones—posee tres grados de libertad, utilizando la manera de hablar clásica—, H tendrá una forma más complicada, en la que el símbolo d^2/dx^2 quedará sustitutido por ∇^2. Estos detalles, sin embargo, no afectan a los axiomas enunciados ni a ninguna parte de la estructura lógica aquí presentada.

En el caso de los sistemas que contienen más de una "partícula" [14] se produce un importante cambio en el formalismo: la función de estado implica entonces más de tres variables de espacio, y no puede ser representada ni imaginada visualmente en el espacio ordinario. Pero los espacios multidimensionales, usuales en la mecánica estadística, se pres-

[14] Los físicos continúan utilizando el lenguaje clásico debido a su calidad directa, aunque es inexacto. Véase la nota 11.

tan fácilmente a ser empleados para la descripción de sistemas de muchas partículas, de modo que no se presenta por ello ninguna dificultad. En este caso hay que percatarse de que los cuatro axiomas expuestos en este capítulo son incompletos, y necesitan que se los complemente mediante un requisito concerniente a las *simetrías* (cf. capítulo XX) de la función de estado; mas tales requisitos carecen de significado para partículas sueltas, por lo cual los hemos excluido del presente estudio.

El defecto más importante de la exposición que hemos hecho radica en su limitación a estados que no cambien con el tiempo. Pues hemos supuesto que la función de estado ha de ser $\varphi(x)$, no $\varphi(x, t)$, es decir, hemos considerado estados en algún instante particular; sin embargo, en general, la función de estado cambia con el paso del tiempo.

Si se hiciera una restricción similar en la mecánica clásica, el estudio quedaría confinado al tema de la *estática,* mientras que la *dinámica* no se tomaría en consideración; así, pues, en el sentido más estricto, los cuatro axiomas precedentes definen el campo de la *estática cuántica,* y no tienen en cuenta la *dinámica cuántica.* Para tratar de este otro campo, más amplio, hay que introducir una "ecuación de movimiento" análoga a la segunda ley de NEWTON, que es lo que haremos en la sección siguiente; y el axioma 5 amplía la estática cuántica, transformándola en la disciplina, más amplia, de la mecánica cuántica al añadir el tema de la dinámica cuántica. Estas observaciones bastan para esbozar la terminología y proporcionar una orientación general.

Antes de dar comienzo a la última etapa de nuestro actual viaje, añadamos unas palabras de estímulo al lector que ve ante sí otra larga y difícil tarea. En la física clásica, al tratar del tema de la estática, queda todavía por delante la mayor parte de la mecánica. Pero en la mecánica cuántica la división de materias es totalmente diferente: la estática cuántica es, con mucho, la parte más amplia y más completamente desarrollada de la nueva mecánica; es el tema de los *estados estacionarios,* y sucede que en la teoría cuántica un estado estacionario corresponde, por regla general, a un estado dinámico en la física clásica (corresponde, en realidad, a un estado en el que las fuerzas no sean funciones del tiempo); así, todo movimiento periódico de la física clásica, al que le corresponde ser estudiado en la dinámica ordinaria, tiene como contrapartida cuántica un estado estacionario, cuyo estudio pertenece a la estática cuántica. Los estados que hemos considerado en las secciones precedentes eran estacionarios, aunque sus análogos en la física clásica involucren electrones *en movimiento.* Por consiguiente, el último axioma a estudiar cubre un campo más pequeño de lo que podría haberse esperado, y cabe exponerlo brevemente.

17.8. AXIOMA 5. LA DINÁMICA CUÁNTICA

Quede bien entendido que en la presente sección todos los axiomas anteriores permanecen intactos. Tampoco varía el significado de los es-

tados y los operadores, pero el operador de energía, H, definido para el electrón libre en la tabla 17.1, presenta aquí especial importancia.

Formulemos la siguiente pregunta: supuesto que el estado del electrón sea ahora $\varphi(x)$, ¿cuál será en cierto instante posterior? La pregunta nos obliga a incluir el tiempo (t) como segunda variable independiente entre los argumentos de φ; pero las ecuaciones (17.11) y (17.12) no varían, siendo el único efecto sobre ellas que $b(q)$ y $W(q)$ son ahora funciones también del tiempo. En particular, la probabilidad de encontrar el electrón en x, todavía dada por $[\varphi]^2$, cambiará en el tiempo, ya que φ es una función del tiempo; y si consideramos esta distribución de probabilidad como una especie de condensación o como una nube en el espacio, esta nube *se difunde* a medida que t aumenta.

El axioma 5 regula el cambio de φ con el tiempo, al decir:

Si φ está dado en un instante cualquiera, su valor en cualquier otro momento es la solución de la ecuación

$$H\varphi = ik\frac{\partial \varphi}{\partial t}, \tag{17.16}$$

siendo H el operador diferencial de que ya hemos hablado y k, de nuevo, la constante $h/2\pi$. La ecuación (17.16), descubierta también por SCHRÖDINGER, será denominada ecuación de SCHRÖDINGER relativa al tiempo, o, más brevemente, *ecuación temporal de* SCHRÖDINGER; de ella habíamos hablado en la sección 17.10.

Obsérvese primero que sus consecuencias no son distintas de las ya estudiadas en todos los ejemplos de la estática cuántica. Pues podemos definir ahora el tema de esta última como aquél que abarca todos los problemas en que el operador H es estático; esto es, que no depende de t. Cuando esto se cumple, basta hacer

$$\varphi = \psi e^{-i(E/k)t} \tag{17.17}$$

en la ecuación (17.16), siendo ψ independiente de t, para reducirla a la (17.3). Se ve también fácilmente que las ecuaciones (17.11) y (17.12), que ahora deben emplearse en las formas (17.11′) y (17.12′), dan lugar al mismo resultado para $W(q)$, ya introduzcamos ψ o $\psi^{-i(E/k)t}$ como función de estado $\varphi(x)$. En consecuencia, por lo que a todos los resultados concierne, la ecuación (17.6) no impone innovación alguna cuando el operador de energía, H, es constante en el tiempo.

Pero H depende de t cuando las fuerzas actuantes sobre el sistema son funciones del tiempo (cuando, según se dice al modo clásico, el sistema no es conservativo). En física este caso es muy interesante y de gran importancia, ya que conduce en línea recta a las modernas teorías de la radiación; pero lo pasaremos por alto, habida cuenta de que aporta poca cosa a las básicas cuestiones que aquí nos ocupan.

Volvamos, pues, a lanzar una ojeada final a la situación estudiada anteriormente, o sea, el caso en que H es constante en el tiempo. Es interesante ver si una función arbitraria $\varphi(x)$, en la que se haya suprimido toda dependencia de t, es estacionaria en el sentido de que, una vez realizada, permanezca invariable en el tiempo [15]. Un cuidadoso examen de la ecuación (17.16) demuestra que esto es imposible, y el ejemplo siguiente presentará los hechos con algunos detalles interesantes.

En la sección 17.6 supusimos, a efectos de argumentación, que $\varphi(x)$ tenía la forma de una curva de GAUSS, de anchura d. No es difícil ver si esta distribución probabilística gaussiana permanece invariable en el tiempo. Con este fin sustituimos simplemente $\varphi = {}^{-1/2(x/d)^2}$ en la ecuación (17.16) como solución válida para $t=0$ y computamos por los métodos normales la solución para cualquier t [16], solución que resulta ser

$$\varphi(x, t) = \left(1 + \frac{ikt}{md^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \exp\left[\frac{-x^2}{2\left(d^2 + \frac{ikt}{m}\right)}\right] \tag{17.18}$$

siendo m la masa de la partícula.

Tal vez encuentre instructivo el lector representar la función $\varphi^*\varphi$ para diferentes valores de t con el fin de estudiar cómo aumenta su anchura con el tiempo: observará que la distribución de probabilidad conserva la forma gaussiana, pero que se dilata con el tiempo, ya que su ancho, que es $\sqrt{d^2 + (k^2 t^2/m^2 d^2)}$, comienza por ser d y llega hasta infinito. Y a este ensanchamiento de la distribución de las posiciones en el espacio es a lo que se llama la difusión del paquete de ondas. Evidentemente, la velocidad de difusión es pequeña si md es grande, y grande si ese producto es pequeño; conclusión que nos será de interés más adelante (en la sección 18.8), cuando investiguemos la física clásica como caso límite de la mecánica cuántica, y que volverá a interesarnos de nuevo en relación con el problema de la causalidad (capítulo XIX).

RESUMEN

El capítulo XVII contiene los puntos esenciales de la estructura matemática de la mecánica cuántica, por lo que puede ser resumido fácilmente. Damos por supuesto un conocimiento del cálculo integral y el diferencial, y explicamos todos los nuevos conceptos en términos familiares al estudioso de estas ramas de las matemáticas.

---

[15] Permanecer invariable en el tiempo significa ser de la forma (17.17), como indican nuestras anteriores consideraciones.

[16] En MARGENAU y MURPHY: *The Mathematics of Physics and Chemistry*, Nueva York, D. Van Nostrand, 1943, pág. 380, pueden verse las pormenores de este ejemplo.

En la experiencia ordinaria, descrita por los métodos de la física clásica, los observables son de la variedad poseída, y la representación adecuada de tales observables es la *función* matemática; es oportuno, por consiguiente, que cosas tales como la posición, la energía y el impulso se consideren como funciones (numéricas) del tiempo. Pero esta representación es totalmente inadecuada para los observables latentes, y debe buscarse un nuevo método cuando sea preciso ocuparse de ellos; este nuevo método se encuentra en la representación de los observables por *operadores.*

En la física clásica un estado era una colección de observables, esto es, de funciones matemáticas, y debe ser ahora una colección de operadores. Puede demostrarse, sin embargo, que semejante colección es equivalente a otra representación matemática, de acuerdo con la cual un estado está dado por una función de coordenadas espaciales $\varphi(x)$; esta función, llamada a veces función de estado y a veces amplitud probabilística, resume todo el significado de un estado físico, y si bien su conocimiento no faculta al físico para decir cuál será el valor obtenido en una medición aislada que se realice de un observable, permite, sin embargo, predecir una distribución probabilística referente a las mediciones de todos los observables. Este resultado es en todo conforme a la naturaleza de los observables latentes: no tiene, pues, el carácter de una descripción incompleta proporcionada por una teoría defectuosa, según se supone a veces.

Las nuevas construcciones interpretativas quedan asentadas mediante los axiomas 1 y 2 (secciones 17.3 y 17.4); exponemos las reglas de correspondencia que las enlazan a la experiencia inmediata en los axiomas 3 y 4 (secciones 17.5 y 17.6), y en las dos últimas secciones añadimos ciertos detalles que son necesarios para conseguir mayor generalidad.

No vamos a utilizar los resultados matemáticos de este capítulo como herramientas cuantitativas en las subsiguientes partes del presente libro, excepto en unos cuantos lugares estratégicos, en los que la precisión es indispensable; pero son necesarios para comprender enteramente el principio de incertidumbre.

BIBLIOGRAFIA

BORN, M., y JORDAN, P.: *Elementare Quantenmechanik,* Berlín, Springer-Verlag, 1930.

DE BROGLIE, L.: *Théorie de la quantification,* París, Hermann & Cie., 1932.

DIRAC, P. A. M.: *Quantum Mechanics,* Nueva York, Oxford University Press, 1930.

HEISENBERG, W.: *The Physical Principles of the Quantum Theory,* Chicago, University of Chicago Press, 1930.

JORDAN, P.: *Anschauliche Quantenmechanik,* Berlín, Springer-Verlag, 1936.

KEMBLE, E. C.: *The Fundamental Principles of Quantum Mechanics,* Nueva York, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1937.

MOTT, N. F., y SNEDDON, I. N.: *Wave Mechanics and Its Applications,* Nueva York, Oxford University Press, 1948.

PAULING, L., y WILSON, E. B., Jr.: *Introduction to Quantum Mechanics,* Nueva York, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1935.
SCHRÖDINGER, E.: *Wave Mechanics,* Glasgow, Blackie Sons, Ltd., 1928.
Von NEUMAN, J.: *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik,* Berlín, Springer-Verlag, 1932 [vers. cast.: *Fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica,* Madrid, C.S.I.C., 1949].

CAPITULO XVIII

INCERTIDUMBRE Y MEDICIONES

18.1. El principio de incertidumbre

Hasta ahora, la costumbre ha sido introducir a los estudiantes en el principio de incertidumbre por medio de ejemplos empíricos bien conocidos, y no cabe duda de que éste es el método heurístico más apropiado para trabar conocimiento con tal principio y aprender a trabajar con él. El nuevo descubrimiento de la incertidumbre se halla realmente preñado de grandes consecuencias pragmáticas, la mayoría de las cuales presentan el enrarecido aire de facticidad y especifidad que va unido a las cuestiones de observación y no a los principios filosóficos. Es comprensible, por lo tanto, que el físico se haya comportado en ocasiones como el orgulloso y algo embarazado propietario de un juguete nuevo y extraño: se ha complacido en invitar a sus amigos a admirarlo y en contemplar el asombro del filósofo cuando se da al interruptor y se lo pone en marcha. Pero el conocimiento así transmitido no equivale a comprensión: por encima de todo, tiende a hacer aparecer el principio de incertidumbre como una proscripción de ciertos procedimientos experimentales o, en el mejor de los casos, como una tesis de mensurabilidad limitada, cuando, de hecho, es una innovación básica en nuestro modo de representar la realidad.

El enfoque inductivo a través de unos experimentos bien elegidos tiene importancia histórica porque es la ancha avenida psicológica que condujo a Heisenberg al descubrimiento del principio. Puede decirse, no obstante, y sin que ello signifique falta de respeto para con los hechos de la historia, que llega un momento en que la necesidad de organizar los conocimientos sugiere otra vía de acceso posible, un enfoque lógico desde la vertiente de los axiomas básicos; y solamente cuando ello se una a la presentación inductiva saldrá a la luz la imagen completa de la cosa, sólo entonces se desvanecerá, por fin, la atmósfera de dogmatismo que rodea a este principio. Pues el filósofo sabe que el físico no ha logrado ser convincente y que, frecuentemente, ni siquiera ha logrado hacerse inteligible cuando trataba de explicar la incertidumbre. Los físicos, en efecto, son propensos a revisar unos cuantos experimentos que muestran que la precisión con que se mide la posición echa a perder la de la medida del impulso, y luego, con el pretexto de extraer conclusiones, anuncian con aire definitivo: la posición y el impulso no son

simultáneamente mensurables, de modo que los experimentos que impliquen lo contrario son imposibles, etc. Mas lo que ahora queremos es poner de manifiesto qué es lo que significan exactamente estas afirmaciones, cómo se hallan enraizadas en la metodología básica de la mecánica cuántica y hasta qué punto están lejos de hacer referencia a hechos incidentales de la experiencia; con este objeto, vamos a invertir deliberadamente el procedimiento habitual y a tratar primero de la génesis lógica de la incertidumbre. Más adelante tendremos ocasión de examinar e interpretar los ejemplos usuales.

El principio de incertidumbre está contenido en los axiomas del capítulo anterior; o, si se prefiere, podemos decir que tales axiomas reflejan la incertidumbre (pero si se adopta esta última versión, nada más justo que agregar que los axiomas implican bastante más que el principio, pese a su espectacular importancia en la historia del tema). En la sección 17.6, y en la figura 17.2 que la acompañaba, dijimos ya, en realidad, qué es lo que significa la incertidumbre, aunque sin hacer especial hincapié en ello; vamos a extraer ahora las características importantes de ese ejemplo y a estudiarlas a la luz de la cuestión que ahora nos ocupa. En la sección 17.6 habíamos adoptado arbitrariamente una función de estado de la forma

$$\varphi(x) = e^{\frac{1}{2}(x/d)^2}$$

que corresponde a una probabilidad en cuanto a posición de la partícula dada en la figura 17.2 *a*.

Esta curva tiene una anchura *d*, e importa mucho recordar claramente el significado de este parámetro. La figura 17.2*a* representa la probabilidad (entendida como frecuencia relativa) de las mediciones de la posición del electrón, y podemos conseguir este estado de cosas mediante un cañón de electrones que los lance sobre una pantalla dispuesta al modo indicado en la figura 16.1, pero sin la primera pantalla. La pantalla *B* estará ahora sensibilizada de modo que se torne luminosa, o lance un destello, en los puntos en que incidan los electrones, cosa que se logra con medios sobradamente conocidos por los fabricantes de osciloscopios y de microscopios electrónicos (por ejemplo, impregnarla con sulfuro de zinc). El cañón estará equipado con diafragmas a diferentes potenciales, de modo que cada electrón que salga se encuentre "preparado" para tener un estado dado por nuestro φ; con lo cual el número de impactos en la pantalla, cuando se represente a lo largo de una línea horizontal que pase por el centro de la gráfica de impactos, estará dado por la figura 17.2*a*, y, por ello, dicha gráfica misma tendrá el aspecto indicado en la figura 18.1. Como se ha visto anteriormente, es indiferente que los electrones lleguen de uno en uno o en gran enjambre, siempre que éste no sea tan denso como para hacer apreciable la repulsión entre electrones (esta condición suele cumplirse en la práctica). Manipulando convenientemente el cañón de electrones puede realizarse la distribución esbozada y, por consiguiente, el estado φ.

Ahora bien: si d es cero, todos los electrones golpearán la pantalla en 0, y la incertidumbre en la posición de un electrón a lo largo del eje a será cero; este resultado no se halla excluido por los axiomas de la mecánica cuántica: corresponde a un estado propio de X, la función delta de la figura 17.1, con $a=0$. Por otra parte, si d es infinita, la incertidumbre de posición es infinita, la gráfica degenerará en una bruma uniforme a todo lo largo del eje a, y la función $\varphi(a)$ se convertirá en una constante. Tomaremos d como medida de la incertidumbre de la po-

Figura 18.1

sición de un electrón a lo largo del eje a, y lo denominaremos brevemente *incertidumbre de posición.*

La teoría mecánica cuántica predice, como se ha indicado en el capítulo anterior, que la probabilidad en cuanto al impulso de los electrones preparados por el cañón para que se encuentren en el estado φ, de que acabamos de hablar, está dada por la figura 17.2*b*. La experimentación hace ver que así sucede, verdaderamente, y, si bien no tenemos intención de insistir sobre ello—damos aquí por sentada la verdad de la mecánica cuántica—, vale la pena, sin embargo, indicar brevemente cómo se asientan tales hechos.

El instrumento más apropiado para utilizar en cuestiones de este tipo es el microscopio de rayos gamma. Tal instrumento, sin embargo, es una plausible ficción y no existe como instrumento adecuado para nuestros actuales fines, de modo que una forma mejor de averiguar el impulso es no "medirlo" en absoluto: nos limitaremos, simplemente, a alejar la pantalla B (cf. la figura 16.1) del cañón y a determinar de nuevo la gráfica de las posiciones; si ésta permanece invariable, todos los electrones tenían el mismo impulso (es decir, cero) a lo largo del eje a[1]; y si es infinitamente difusa, la incertidumbre del impulso (a lo largo del eje a) era infinita. En general, estudiando la gráfica de las posiciones a distancias diversas del cañón puede determinarse la distribución del impulso, distribución que resulta dada por la figura 17.2*b*: la predicción de la mecánica cuántica queda verificada. Queremos hacer hincapié en que *la gráfica de la figura 17.2b se obtiene para el impulso, con independencia de que se haya medido o no previamente la posición de los electrones que den origen a tal gráfica;* en nuestro ejemplo, no se había perturbado antes a los electrones que forman la gráfica del impulso en la figura 17.2*b*.

[1] En la figura 16,1, el eje a es una línea perpendicular a la pantalla B trazada de modo que pase por el centro de impactos.

Si la incertidumbre de posición es d, la del momento está dada por la magnitud correspondiente de la figura 17.2*b*; es k/d. Haciendo $\Delta x \equiv d$ y $\Delta p \equiv k/d$ (en donde designamos con Δ la incertidumbre), tenemos

$$\Delta x \cdot \Delta p = k \tag{18.1}$$

y, como antes, k es la constante de PLANCK (que se suele denotar con h) dividida por 2π. La ecuación (18.1) parece a primera vista un resultado específico producido más o menos accidentalmente por la particular forma elegida para φ, o sea, por el hecho de tener el carácter de una función gaussiana.

En realidad, sin embargo, el resultado es independiente de todos los detalles particulares y aparece en forma manifiesta al final de todo cálculo de este tipo, cualquiera que sea la forma de φ, según se demuestra en muchos libros sobre mecánica cuántica (sin que sea preciso que lo reproduzcamos aquí). Mas es preciso observar algunas precauciones para estabilizar la significación del símbolo Δ, o sea, con objeto de que signifique la misma cosa para diferentes distribuciones φ; pues, indudablemente, es previsible que un cambio en las definiciones de Δ_x y Δ_p provoque un cambio en ciertos detalles de la forma de la ecuación (18.1).

La cantidad d de nuestros cálculos, es la "semianchura" de la curva φ^2 en un punto en que su altura es la fracción $1/e$ de su valor máximo. Evidentemente, nada nos impide tomar como medida de la incertidumbre de la posición algún otro parámetro conveniente, como, por ejemplo, la semianchura de la curva φ^2 a la mitad de su altura máxima; de haberse hecho esto, la constante k de la ecuación (18.1) habría quedado sustituida por $(1n\,2) \cdot k$, magnitud ligeramente distinta de k, pero que todavía tiene las dimensiones físicas y el orden de magnitud de la h de PLANCK. La libertad de elección en el significado de la incertidumbre, que aquí se muestra claramente, se introduce a menudo falsamente en el significado del principio mismo, y muchas exposiciones elementales, al tratar de evitar un compromiso específico en cuanto a la definición de Δ, han creado una gratuita confusión acerca del enunciado mismo del principio.

Se obtiene, sin embargo, una claridad perfecta cuando se toman para Δx y Δp las cantidades que los estadísticos denominan *desviaciones típicas:* éstas se definen más fácilmente y, en general, son más significativas que las semianchuras empleadas en la ecuación (18.1), y conservan un significado perfectamente aceptable aunque φ sea más irregular de lo que es en nuestro ejemplo. La desviación típica para una curva del tipo gaussiano es $d/\sqrt{2}$. En consecuencia, si Δx y Δp son desviaciones típicas, el principio de incertidumbre para la distribución de GAUSS dice:

$$\Delta x \cdot \Delta p = \frac{k}{2}. \tag{18.2}$$

Cuando *no* se especifica el tipo de distribución, es posible demostrar, sin embargo, valiéndose sólo de los axiomas, que

$$\Delta x \cdot \Delta p \geqq \frac{k}{2}. \tag{18.3}$$

Este es el enunciado formal más general del principio que nos ocupa, aplicado a la posición y al momento; y la ecuación (18.2) hace ver que la distribución de GAUSS es aquella para la que una incertidumbre dada respecto de x entraña la mínima incertidumbre en cuanto a p.

El signo de desigualdad en la ecuación (18.3) ha dado origen ocasionalmente a la errónea impresión de que uno no sabe nunca cuáles son las incertidumbres, aun cuando las Δ estén bien definidas; pero tal ignorancia es por completo espúrea cuando se conoce el estado, ya que el axioma nos dice con todo detalle cómo se ha de calcular la distribución (y, por consiguiente, la desviación típica) de las mediciones del impulso cuando esté dada la función de estado (y, por consiguiente, la desviación típica de las posiciones): en efecto, se conocen con toda exactitud Δx y Δp, y, por consiguiente, su producto, para todo $\varphi(x)$. Es preciso tener esto presente para que el principio en cuestión no sufra una incertidumbre adicional distinta de la que objetivamente afirma.

Una desigualdad como la ecuación (18.3) no se cumple solamente para los observables posición e impulso, que hemos utilizado nosotros como ejemplo, sino también para otros. Los físicos admiten que ciertos pares de observables están en correlación de cierta manera que no necesitamos explicar aquí, y dicen que los elementos de cada una de estas parejas son "canónicamente conjugados"; en los ejemplos están la posición y el impulso, el ángulo y el momento angular, el tiempo y la energía. Todos los pares conjugados poseen la característitca común de que el producto de sus dimensiones físicas tiene la dimensión de la acción; y *para todos los pares conjugados canónicamente se cumple la desigualdad* (18.3), de manera que

$$\Delta\theta \cdot \Delta L \geqq \frac{k}{2} \tag{18.4}$$

$$\Delta t \cdot \Delta E \geqq \frac{k}{2} \tag{18.5}$$

supuesto que los símbolos θ, L, t y E, denoten, respectivamente, el ángulo, el momento angular, el tiempo y la energía. Aquí tenemos que enunciar estos resultados sin demostración; son resultados que se siguen de la forma de los operadores correspondientes a los observables que entren en ellos. En otras secciones posteriores veremos ejemplos que mostrarán más claramente el significado de la ecuación (18.5); pero volvamos primero a considerar un poco más la posición y el momento.

18.2. Casos límite del principio de incertidumbre [2]

Supongamos que la posición de los electrones que salen del cañón de que hemos hablado en la sección 18.1 sea clara, lo que significa que chocarán con la pantalla en un punto, el cero, por ejemplo, y que por consiguiente, la gráfica de la figura 18.1 será una línea vertical que pase por 0; entonces, $\Delta x=0$. Es interesante ver qué es lo que los axiomas dirán ahora de Δp.

En forma matemática, la suposición que acabamos de enunciar se expresa del modo siguiente:

$$\varphi(x)=\delta(x, 0).$$

Es preciso introducir esto en la ecuación (17.11) con el observable p reemplazando al indefinido q. Pero $\psi_p(x)$ puede tomarse de la tabla 17.2, con lo que la ecuación (17.11) adopta la forma

$$b(p)=c\int_{-\infty}^{\infty}\delta(x, 0)e^{ipx/k}\,dx.$$

Los ingenieros electricistas reconocerán en seguida esta integral como la transformada de Fourier de la función delta; sin embargo, no necesitamos acudir a las matemáticas superiores para obtener su valor: el integrando es cero en todos los puntos, excepto en $x=0$, y, por consiguiente, la integral es proporcional al valor de $e^{ipx/k}$ en ese punto, que es 1. En otras palabras: la integral no es una función de p, sino una constante con respecto a p. Por ello, de acuerdo con la ecuación (17.12), $W(p)$ es también una constante: la probabilidad de medir un p dado es la misma, sea cual fuere el valor de p, y la incertidumbre en p es infinita; de este modo tenemos la respuesta a nuestra pregunta inicial: para el caso especial de que Δx sea cero, el principio de incertidumbre fuerza a Δp a ser infinito.

Supongamos ahora que esté presente un estado propio del observable impulso, e inquiramos acerca de la distribución de x. Si se sabe que el impulso es invariablemente p, entonces

$$\varphi(x)=\psi_p=ce^{ipx/k}.$$

Pero, de conformidad con la tabla 17.2, hemos demostrado ya de una vez para siempre que la probabilidad de medir la posición es $W(x)=[\varphi(x)]^2$ [véase la ecuación (17.12)]. En este ejemplo, sin embargo, en el que φ es compleja, el cuadrado tiene que reemplazarse por $\varphi^*(x)\varphi(x)$; y puesto que $e^{-(ipx/k)}\cdot e^{(ipx/k)}=1$,

$$W(x)=\mathrm{C^{te.}}.$$

[2] El lector no matemático puede muy bien pasar por alto esta sección.

La gráfica de la figura 18.1 será ahora una mancha uniforme: la incertidumbre de la posición es infinita porque la correspondiente al impulso es cero.

Estos son, evidentemente, los dos casos extremos a los que puede aplicarse el principio de incertidumbre: en uno la posición era exacta y, por consiguiente, el impulso infinitamente difuso; en el otro ocurría lo contrario. En general, la situación es intermedia entre estos ejemplos límite.

18.3. Ejemplos de incertidumbre

Nos hemos esforzado por poner de manifiesto cómo surge el principio de incertidumbre y extrae su significado del más profundo estrato de la mecánica cuántica, de la doctrina epistemológica que relaciona el estado de los sistemas atómicos con un *agregado* de experiencias referentes a datos y no con un único complejo llamado medición. Este principio presenta la legalidad residual—entendiendo ahora el término de legalidad al modo de la mecánica clásica—que sigue prevaleciendo para los agregados de observaciones (sin hacer así referencia a *colectivos* no sería posible enunciar con precisión su significado).

Naturalmente, tal principio implica también que las observaciones aisladas no pueden ser determinantes del tipo de conocimiento que es necesario para la predicción, ni siquiera para la predicción mecánico-cuantista o estadística: la incertidumbre tiene que producir siempre un efecto destructivo sobre la pertinencia física de las mediciones realizadas en observables conjugadas. En los diversos casos individuales, este efecto puede adoptar formas distintas: la interacción entre el sistema sometido a observación y el instrumento de medición puede hacer que sean muy inexactas las conclusiones que se extraigan; incluso sin efectuar medición alguna, un sistema puede ocultar qué posición determinada tiene bajo el aspecto de ser una onda; o puede aparecer un proceso en el que un sistema pierda una forma de precisión mientras gane otra (cosa que conocen los físicos con el nombre de "difusión de los paquetes de ondas"). Tales efectos son múltiples y no fáciles de clasificar; colectivamente tomados, son manifestaciones de lo que anteriormente hemos denominado la bruma de lo inmediatamente dado; y una virtud cardinal del principio de incertidumbre radica en el hecho de reunirlas en una destacada aunque abstracta generalización.

Vamos a presentar ahora unos cuantos ejemplos del tipo más sencillo que permite examinar detalladamente las maneras en que se las arregla la incertidumbre para oscurecer la situación clásica. Pueden encontrarse otros muchos en los famosos trabajos de Bohr[3] y en el mi-

[3] Por ejemplo, en N. Bohr: *Nature*, 121:580 (1928).

nucioso resumen del propio HEISENBERG[4]; mas lo que justifica la reducida selección que hemos hecho son dos circunstancias: primera, que queremos emplear un mínimo de recursos técnicos de la física; segunda, que muchos de estos ejemplos se han difundido mucho y son fácilmente accesibles.

a. Supongamos que se sepa que un electrón está en alguna parte a lo largo de una línea, pero dentro de un intervalo Δx. Puesto que ha de estar representado por una onda, podemos parafrasear lo indicado diciendo que la onda tiene desplazamientos finitos dentro del intervalo Δx y desplazamientos nulos fuera de él; mas para que una onda tenga desplazamientos nulos ha de sufrir una interferencia destructiva, y, por ello, es necesario formar la onda representativa del electrón de que estamos tratando a base de *varias* ondas sinuosidales, ya que una onda

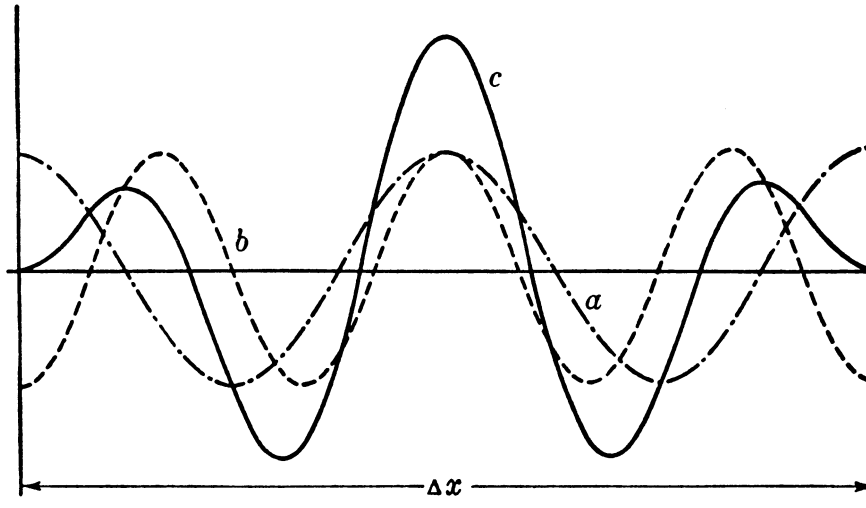


Figura 18.2

no puede interferir consigo misma. Dicho de otro modo: tenemos que emplear un sistema de ondas, un paquete de ondas, para representar el estado del electrón.

Exigimos que los diversos componentes del paquete se anulen mutuamente en los extremos del intervalo Δx (haremos caso omiso por el momento de lo que suceda fuera de ese ámbito). Ahora bien, resulta evidente que para lograr la anulación se requieren por lo menos *dos* ondas sinusoidales; y si una de ellas tiene n (un número entero de) longitudes de onda en Δx, la otra debe tener por lo menos $n+1$. En la figura 18.2 puede verse representado este estado de cosas para $n=2$: la onda *a* tiene dos longitudes de onda, la onda *b* tres longitudes de onda

[4] W. HEISENBERG: *The Physical Principles of the Quantum Theory*, Chicago, University of Chicago Press, 1930.

dentro de Δx; y su resultante, c, es la línea de trazo intenso, que, evidentemente, tiene desplazamientos nulos en los puntos extremos del radio. Las longitudes de onda de a y b son, respectivamente, $\lambda_a = \Delta x/n$, y $\lambda_b = \Delta x/(n+1)$.

Obsérvese que los recíprocos de las longitudes de onda difieren en $1/\Delta x$, esto es que $\Delta(1/\lambda) = 1/\Delta x$. Pero hay que tener en cuenta que hemos adoptado la suposición mínima: podríamos también haber conseguido la interferencia en los puntos extremos atribuyendo a la onda b, $n+2$ período $n+3$ período, etc., dentro de Δx. En tales circunstancias, $\Delta(1/\lambda)$ hubiera valido $2/\Delta x$, $3/\Delta x$, y así sucesivamente; en consecuencia, escribimos para mayor generalidad

$$\Delta\left(\frac{1}{\lambda}\right) \geq \frac{1}{\Delta x}.$$

Al llegar a este punto vamos a utilizar la ecuación de DE BROGLIE (cf. la sección 16.2), $\lambda = h/p$. Cuando se hace la sustitución adecuada para $1/\lambda$, la desigualdad arriba indicada es $\Delta(p/h) \geq 1/\Delta x$; y como h es una constante, ésta se convierte en seguida en algo parecido a la relación de incertidumbre:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h \ ;$$

se diferencia, sin embargo, de la ecuación (18.3) por presentar h en lugar de $h/4\pi$, cosa que se debe al diferente significado de la incertidumbre aquí adoptado, pues las Δ empleadas en la exposición anterior no significan desviaciones típicas, sino todo el intervalo en que se pueden encontrar los observables.

Nuestro resultado no garantiza que las ondas interferirán destructivamente fuera del intervalo Δx, ya que hemos hecho que se anule el desplazamiento de la onda solamente en los puntos extremos. Para asegurar la interferencia en todo otro lugar fuera de Δx, es preciso introducir nuevas ondas, que, sin embargo, no impedirán la interferencia de las dos elegidas hasta ahora; estas ondas complementarias deben ser de longitud de onda más pequeña que b, y, por consiguiente, los recíprocos de sus longitudes de onda diferirán de $1/\lambda_a$ en mayor medida aún que la que hemos considerado. Todo esto fortalece la desigualdad que hemos deducido, pero no afecta a su enunciado formal.

En el presente ejemplo no interviene medición alguna: la incertidumbre proviene solamente del aspecto ondulatorio del electrón, aspecto que refleja lo que anteriormente hemos denominado carácter latente del observable posición. Preferimos dejarlo así, pese a la tendencia de los físicos a seguir la pista a todas las incertidumbres hasta llegar, como origen, a los instrumentos de medida; cosa que, naturalmente, puede hacerse si uno no es demasiado delicado en sus razonamientos: pues puede uno decir que el electrón no actuaría como una onda si su posición no fuese medida nunca: *ergo* es la medición lo que le hace comportarse como una onda y lo que, por tanto, es causa de la incertidum-

bre. Como es natural, la medición se halla por completo indefensa frente a esta acusación, ya que es la fuente de todo lo que llegamos a saber acerca del electrón; pero la cuestión aquí planteada afecta a la interpretación última de todos y cada uno de los ejemplos incluidos en esta sección. Teniendo esto en cuenta, aplazamos el enfrentarnos de nuevo con ella hasta que estemos en condiciones de resolverla más satisfactoriamente; y para hacerlo se necesita, en primer lugar, evidentemente, un concienzudo examen de lo que significa una medición, cosa que posponemos hasta la sección siguiente.

b. También tenemos muy a mano un ejemplo ilustrativo de las incertidumbres relativas a la energía y el tiempo, representadas por la ecuación (18.5): es un ejemplo que se basa en la relación de PLANCK, BOHR y DE BROGLIE entre energía y frecuencia. Dondequiera que haya energía, E, se presume que hay una vibración de frecuencia ν, tal que

$$E = h\nu \ ;$$

pero cuando esto se toma seriamente, como debe ocurrir en la física atómica, sugiere la idea de que para medir E debemos contar las vibraciones; entonces, el error referente a E, ΔE, es $h\Delta\nu$, siendo $\Delta\nu$ el error o incertidumbre acerca de ν. Ahora bien, el acto de contar se realiza recitando los números enteros, y un error, si se comete, ha de ser, como mínimo, igual a 1; además, nunca podemos estar seguros de que no se haya cometido un error mínimo. Puesto que $\nu = n/\Delta t$, siendo n el número contado y Δt el intervalo temporal del contar, $\Delta\nu = \Delta n/\Delta t$. Pero $\Delta n \geqq 1$. Reuniendo estos resultados, tenemos,

$$\Delta E = h\Delta\nu = h\frac{\Delta n}{\Delta t} \geq \frac{h}{\Delta t},$$

de modo que

$$\Delta t \cdot \Delta E \geq h.$$

Tampoco este resultado concuerda exactamente con la ecuación (18.5), en este caso en razón de haber variado el significado de la incertidumbre.

Uno se pregunta ahora, naturalmente, por qué t tiene que ser una incertidumbre en el tiempo. El supuesto previo que hemos asumido al respecto era que a lo largo de todo ese intervalo la frecuencia era ν y la energía, E; pero en cualquier subintervalo el cociente $\Delta n/\Delta t$ podría haber sido distinto. Desde este punto de vista. Δt es, verdaderamente, el mínimo período de tiempo a lo largo del cual podría estar garantizado que la energía haya sido E. Mas no es prudente sacar demasiada punta a la lógica de ningún ejemplo aislado, pues en cada uno de ellos se sabe lo que va a obtenerse, y el rigor así alcanzable no es el óptimo que puede lograrse mediante un razonamiento físico. Esta es una nueva razón del débil atractivo que presenta el principio de incertidumbre cuando se lo presenta fragmentariamente, valiéndose de ejemplos concretos.

c. Los fotones están asimismo sometidos también a incertidumbres. Para verlo con un ejemplo, recordemos primero un hecho de la teoría ondulatoria clásica sobradamente conocido de todos los que están versados en las transmisiones por radio: cuanto más corto sea el tiempo de emisión de una señal, mayor será la gama de frecuencias que, forzosamente, ha de contener[5]; en cambio, para que una señal posea una sola frecuencia, ha de durar eternamente. En términos matemáticos: si Δt es el tiempo de emisión y $\Delta\nu$ la gama de frecuencias que componen la señal,

$$\Delta\nu \geq \frac{1}{\Delta t}. \tag{18.6}$$

A veces, se denomina a $\Delta\nu$ la anchura de la banda de frecuencia; representa el margen de incertidumbre con respecto a la frecuencia. En el mismo sentido, Δt es la incertidumbre en el tiempo de emisión o, en general, la incertidumbre acerca del instante en el que la señal pase por un punto dado.

Ahora bien, de acuerdo con la teoría cuántica de la luz, el impulso de un fotón es $p=h\nu/c$, siendo c la velocidad de la luz; y la incertidumbre relativa el impulso, Δp, es igual a $(h/c)\Delta\nu$. Empleando la ecuación (18.6), tenemos $\Delta p \geqslant h/c\Delta t$. Pero, ¿qué es $c\Delta t$? Es la distancia a lo largo de la cual circula la luz en un tiempo igual a su tiempo de emisión, esto es, la longitud del tren de ondas que constituye el fotón, y ésta es la incertidumbre de posición, Δx. El resultado obtenido, por tanto, es de nuevo

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq h.$$

d. Aún más sencilla de demostrar es la ecuación fotónica análoga a la (18.5); pues sabemos que la energía de un fotón es $E=h\nu$, y, por consiguiente, $\Delta E=h\cdot\Delta\nu$; basta combinar este resultado con la ecuación (18.6) para obtener

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h.$$

e. La posición de una partícula puede ser determinada utilizando un microscopio. Para localizar un electrón con precisión atómica es preciso utilizar la luz de más corta longitud de onda conocida, esto es, los rayos gamma. Pero si la longitud de onda es pequeña, la frecuencia es grande, y el impulso $p=h\nu/c$ es correspondientemente grande; ahora bien, tal luz, necesaria para una medición precisa de posición es, por tanto, como un veloz proyectil, y comunica un apreciable impulso al electrón al que golpee, alterando, por consiguiente, su impulso original en una cuantía incontrolable: una medición exacta de posición "echa a perder" el impulso de la partícula.

Inversamente, si este impulso ha de medirse con la máxima precisión, el proyectil fotón que debe ser reflejado por la partícula habrá de tener

[5] Por esa razón, no es posible tocar un *staccato* con órgano, cada uno de cuyos tubos tiene una respuesta de frecuencia bien definida, pero muy limitada.

un impulso propio pequeño y, por tanto, una ν pequeña (o sea, una longitud de onda grande). Mas la precisión en cuanto a la posición transmitida por una gran longitud de onda es pequeña, ya que, ciertamente, el objeto reflectante no puede ser localizado dentro de un espacio menor que una sola onda [6]. Estos hechos excluyen la precisión simultánea en la medida de la posición y el impulso (o velocidad).

Para hacer cuantitativas estas consideraciones, recordemos un teorema de la óptica, que declara que la distancia mínima de resolución para cualquier microscopio es

$$\Delta x = \frac{\lambda s}{D}.$$

En esta fórmula, Δx es la distancia entre dos puntos del objeto que justamente puedan ser reconocidos como distintos con el microscopio; λ es la longitud de onda de la luz empleada, s la distancia entre el objeto y el instrumento y D el diámetro del objetivo. A los efectos que ahora nos ocupan, podemos considerar Δx como la incertidumbre en la posición de la partícula a considerar.

Al reflejar la luz, la partícula sufrirá un retroceso que, por la teoría del efecto COMPTON, se sabe que es de magnitud h/λ. Este retroceso no es enteramente paralelo al plano focal del microscopio en que se mida la distancia x, pero su magnitud, en esa dirección, Δp, es al menos $(h/\lambda)(D/s)$. Combinando este resultado con la ecuación anterior, tenemos finalmente

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq h$$

como habíamos hallado antes.

f. Un ejemplo más sencillo está constituido por un haz de partículas que atraviesen una estrecha rendija de anchura d. Puesto que al otro lado de la rendija el haz tiene también una anchura d, puede elegirse esta cantidad para representar la incertidumbre de posición de las partículas, Δx, en una dirección perpendicular al haz. Pero las partículas quedan también difractadas, por lo que ya no se mueven en la misma dirección después de atravesar la rendija; y, como se sabe por la óptica elemental, el haz que sale de ésta tiene una apertura angular α tal que $\operatorname{sen} \alpha = \lambda/d$, siendo λ la longitud de onda de DE BROGLIE. Las partículas de los rayos extremos que componen el haz tienen un impulso $p \operatorname{sen} \alpha$ en la dirección x, y, por consiguiente, la incertidumbre acerca del impulso es igual o mayor que esta cantidad

$$\Delta p \geq p \operatorname{sen} \alpha = \frac{h}{\lambda} \operatorname{sen} \alpha = \frac{h}{\lambda} \frac{\lambda}{d}$$

---

[6] Ningún objeto pequeño que flote sobre el agua hace reflejarse en cantidad apreciable las olas.

si se utiliza la relación de DE BROGLIE $p=h/\lambda$. Cuando emparejamos el último resultado con la identidad $d=\Delta x$, obtenemos $\Delta p \cdot \Delta x \geqslant h$.

Suele citarse también este ejemplo como prueba de la destructiva acción de la medición sobre los observables: se considera el paso a través de la rendija como una medición de posición, y el efecto difractante, como una destrucción de la precisión que poseía originariamente el impulso. Haremos ahora una pausa para estudiar más atentamente esta interpretación de la *medición,* así como varias otras.

18.4. ¿QUÉ ES UNA MEDICIÓN?

La necesidad de examinar el significado de un término tan familiar como es el de medición no proviene de cambios de concepción que se hayan producido en la física cuántica. De hecho, la medición, que es la última apelación del científico a la Naturaleza y, por consiguiente, incluye una referencia última a esa parte de la experiencia humana que no se halla bajo su control, no puede cambiar su singular carácter sin alterar todo el conjunto de la ciencia de un modo mucho más profundo que el que haya intentado jamás la mecánica cuántica. El hecho de que el hombre de ciencia esté fundamentalmente dispuesto a reconocer a la medición como lo que ha sido y es, forma la hebra de continuidad que discurre desde la física clásica a la moderna; y tenemos ahora necesidad de estudiar la medición precisamente para recordar y hacer resaltar este elemento de continuidad; pues, con gran frecuencia, la reacción por parte de los científicos a la novedad del razonamiento cuántico ha sido una notable propensión a utilizar muy vagamente el término *medición,* incluso a abandonar su significado tradicional en la física clásica. Esto nos parece desafortunado.

Evitando todo alambicamiento, vemos fácilmente que la medición implica: 1) un objeto (en nuestra terminología, un sistema físico) sobre el que ha de realizarse una operación; 2) un observable cuyo valor ha de ser determinado; 3) algún aparato por medio del cual pueda llevarse a cabo la operación. El objeto puede ser una mesa, el observable una longitud y el aparato una cinta métrica: y también el objeto puede ser un electrón, el observable su impulso y el aparato un microscopio de rayos gamma. En este último caso nos hallaríamos empeñados en un experimento mental conducente a una medición, y no queremos excluir tales tipos ideales de operación, siempre que no violen las leyes confirmadas de la física. En cuanto a 3), el aparato puede ser un contador, el ojo de un observador o algún otro órgano sensible.

Los elementos 2) y 3) se hallan estrechamente relacionados, particularmente en los ejemplos atómicos, donde los observables pueden ser latentes y extraer sus peculiaridades de los procedimientos operacionales que conduzcan a su determinación. Sin embargo, la variedad de observables es pequeña y la variedad de procedimientos ilimitada, de modo que no

es posible identificar entre sí observables y operaciones; como hemos puesto de manifiesto en el capítulo XII, estas últimas sirven como definiciones epistémicas de aquellos, y lo hacen tanto para observables latentes como para observables poseídos, del tipo usual. Quizá valga la pena de recalcar esto: las operaciones capaces de conducir a la medición, si bien producen valores numéricos, definen también la construcción interpretativa que en cada caso llamaremos observable.

Objeto, observable y aparato son esenciales para la realización de una medición, pero no son por sí solos suficientes para constituir una. Pues supóngase que quiera uno medir la velocidad de un caballo de carreras por medio de una cámara cinematográfica; se dispondrá de los tres elementos, y supongamos que se realiza la operación requerida; pero tal vez suceda que el caballo esté desenfocado, o que la película se haya revelado mal y no proporcione la información buscada. No cabe duda de que lo que hicimos fue un experimento, una observación, pero, ¿fue una medición? La contestación es, evidentemente, negativa. Puede ser que alguien prefiera llamarla una medición infructuosa; mas, aun admitiéndolo, nos vemos obligados a limitar nuestra atención a las mediciones fructuosas, ya que sólo éstas son de interés en la ciencia; y en ninguna parte de la ciencia, incluyendo la mecánica cuántica, puede tolerarse desviación alguna de esta máxima.

Una medición es más que un experimento, más que una observación; difiere de ambas cosas por el hecho de que culmina en la obtención de un *valor numérico:* sin tal resultado, lo que pretendía ser una medición es, simplemente, una *operación,* término que puede emplearse satisfactoriamente para designar todos los procedimientos comúnmente denominados observación, experimento, manufactura de equipo y lo que más adelante estudiaremos con el nombre de "preparación de un estado" (naturalmente, incluye la medición). Desde nuestro actual punto de vista resulta indiferente que el valor numérico obtenido en una operación de medir sea en cierto sentido correcto o incorrecto; en cualquier caso, esto no puede solventarse haciendo referencia exclusivamente al resultado de la medición. De ahí que una medición incorrecta siga siendo una medición, mientras que una infructuosa (que no logre producir un número) no lo sea.

Una sola medición no proporciona nunca el máximo de información deseable acerca de un observable, y el científico suele ser reacio a admitir que sea significativo el resultado de una única medición. Siempre que es posible, un *conjunto* de mediciones, tratado estadísticamente para ofrecer un valor óptimo, se sitúa frente a una predicción teórica en búsqueda de confirmación (cosa que hemos visto más ampliamente en el capítulo VI). Ninguna de estas características varía en la mecánica cuántica: en realidad, quedan más nítidamente delineadas a la luz proyectada sobre el problema de la medición por la latencia de los observables atómicos.

Quizá sea instructivo revisar los ejemplos de incertidumbre descritos en la sección precedente. El primero implicaba ciertos argumentos teóricos acerca de cómo es posible formar un paquete de ondas; pero ningún

aparato, ningún número se hallaban de manifiesto; por ello el ejemplo no constituía un experimento, y sería incorrecto insinuar que remite el origen de la incertidumbre a una medición (ni, en realidad, a ninguna operación física).

El ejemplo *b,* la determinación de energía mediante un acto de contar, constituye una medición, pues recurre a un sistema (el que posee la energía), un observable (ν) y un aparato (el ojo, el espectrógrafo, o cualquiera que sea lo que registre las vibraciones); y, lo que es más importante, da origen a un número, n, a partir del cual se calculan, por fin, ν y E. Aquí puede decirse con verdad que una medición es la fuente de la incertidumbre. Tal vez parezca extraño, sin embargo, que su origen físico no sea una interacción con un instrumento medidor, sino más bien una especie de deficiencia por parte del observador, que sólo puede contar números enteros y es incapaz de certificar fracciones de vibración.

Los ejemplos *c* y *d* son muy semejantes: razonan acerca de observables a base de teorías que permiten representarlos. Pero, por no involucrar medición alguna, hacen pensar en otro origen de la incertidumbre: el tiempo finito de emisión de la luz. La incertidumbre ha quedado ahora implantada en el fotón, en su nacimiento, y se ha tornado singularmente independiente de todo agente humano.

El microscopio de rayos gamma de HEISENBERG proporciona mediciones de la posición y el momento de un electrón. En el ejemplo *e,* por lo tanto, se muestra claramente que la medición, y en particular esa fase de ella durante la cual el aparato interacciona con el sistema, *puede* ser el origen de las incertidumbres —relacionadas entre sí— en los observables conjugados. El libro de HEISENBERG contiene otros instructivos ejemplos de este tipo.

Finalmente, en el ejemplo *f* encontramos algo que suele ser mal interpretado y necesita un examen más detenido. Si un electrón o, en general, una partícula libre atraviesan la rendija, se sabe que su posición se hallará dentro de la anchura de ésta. Existen, pues, las tres condiciones previas para una medición, el sistema (la partícula), el observable (la posición) y un aparato (la pantalla con una rendija); y *parece* que contamos con un número, la coordenada de la (o del centro de la) rendija, que especifica la posición de la partícula después de su paso a través del "instrumento medidor". Es extraño cuán prontamente han aceptado algunos físicos esta ilusión; pues, ¿no es evidente que no existe ningún número que guarde ni siquiera la más remota relación con la partícula hasta que se haya *visto* a ésta atravesar la rendija? Disponer simplemente la instalación y argumentar luego sobre lo que sucede no es hacer una medición: para completarla, el electrón tiene que someterse a alguna comprobación de presencia, comprobación que introducirá nuevas incertidumbres. Lo que hemos dicho demuestra que el ejemplo *f* no representa una medición; pero las observaciones que acabamos de hacer son más importantes en una fase posterior de nuestro estudio, y las recordaremos en su momento.

Está claro que las fuentes de incertidumbre son numerosas y no resi-

den invariablemente dentro de esa restringida clase de operaciones llamadas mediciones. Por otra parte, el efecto de las mediciones sobre los sistemas físicos es igualmente difícil de especificar a base de características restringidas, como vamos a ver ahora. En la física clásica se supone sin graves riesgos para la precisión que el efecto de la medición sobre un sistema es nulo; por decirlo más adecuadamente: si bien se reconoce que se produce un efecto, se supone que este último puede quedar reducido a una magnitud despreciable si se tiene suficiente cuidado en la operación de medir, y la teoría sigue adelante sin prestarle atención. Pero dos circunstancias singulares tornaron dudosa la adecuación de este supuesto para los *sistemas atómicos:* una es la pequeñez de los sistemas atómicos y su consecuencia, la cantidad relativamente pequeña de energía contenida en ellos; y la otra es el hecho de que la energía está cuantizada, siendo el *cuanto* de magnitud comparable a las energías atómicas en cuestión. Por consiguiente, el efecto de la medición no puede despreciarse.

Este efecto es completamente distinto para sistemas diferentes y varía desde una leve alteración hasta la catástrofe: para medir la posición de un protón sólo es necesaria una pequeña interferencia con su estado de movimiento, *aquí con el impulso, concebido a la manera clásica;* para medir la posición de un fotón el método usual es *destruirlo,* pues toda observación directa de un fotón, tal como la que necesariamente está involucrada en una medición, requiere su absorción, requiere no sólo poner fin a su estado, sino, de hecho, destruirlo como entidad real. Mas no es el fotón una excepción a este respecto: el electrón manifiesta a menudo una similar y drástica reacción al acto de ser observado; pues la forma usual de detectar su presencia es recogerlo sobre un electrodo, lo cual, ciertamente, pone fin a su anterior estado, ya que el electrón, al ser absorbido en un metal, deja de ser la partícula libre que era antes, la partícula cuyo carácter había de ser puesta de manifiesto en la medición; y los mesones y neutrinos quedan también destruidos cuando se los somete a medición. La física atómica se ha unido a la biología en el reconocimiento de que los experimentos significativos pueden matar el sistema.

¿Hemos de expulsar tales operaciones catastróficas de la clase de buenas mediciones? Hacerlo convertiría a la física atómica experimental en un campo yermo, ya que nos dejaría con una definición inservible para la mayoría de los fines perseguidos. La teoría cuántica viene aquí en nuestra ayuda y salva la situación a través de su notable virtud de ser capaz de operar con precisión en situaciones en las que el resultado de una medición, en términos clásicos, es desastrosa para su estado; y logra esta virtud, no siguiendo en detalle el efecto de la medición sobre los observables, como se vería obligada a hacer la física clásica, sino incorporando la incertidumbre estadística a sus mismos axiomas. Con este golpe maestro se ha liberado de la engorrosa necesidad de apreciar a cada instante las alteraciones debidas a la medición.

La clase de incertidumbre a la que *no* se trata automáticamente de esta forma es la atribuible a inexactitudes *evitables* de la medición. A este

respecto, la mecánica cuántica no se encuentra en mejor situación que la física clásica, y procede de la misma manera que esta disciplina para eliminar los errores ordinarios (así debe ser, pues las precauciones que se tienen que tomar están relacionadas con objetos de magnitud ordinaria y con su acoplamiento, y la física clásica es la guía adecuada para realizar tales tareas).

Una observación final acerca de la medición. En lenguaje ordinario, el resultado numérico de una medición caracteriza el estado del sistema observado en el instante en que se haga la observación. Si el proceso que constituye la medición requiere un tiempo finito, la referencia del valor medido se torna ligeramente inexacta, pero se suele admitir que apunta al instante en que comenzara el proceso: un velocímetro mide la velocidad de un automóvil en el momento en que se lo consulte, no la de cinco minutos antes o la de cinco minutos después; o, por hablar con mucha precisión, mide la velocidad del coche en un instante que precede por un pequeño intervalo al instante de la observación, intervalo que es igual al tiempo que necesita el par de giro para ser transmitido por un cable flexible desde la rueda hasta el salpicadero. Pero nunca decimos que estamos midiendo el valor de una cantidad en un tiempo futuro, aunque tal vez sea posible *predecir* ese valor sobre la base de una medición practicada ahora.

En la física clásica, donde apenas importa, esto se da por sentado. En la mecánica cuántica, donde, por el posible fin catastrófico de las mediciones, la claridad en cuanto a la referencia al tiempo es de la máxima importancia, han surgido gran cantidad de confusiones. En estudios poco precisos sobre la incertidumbre no es infrecuente la práctica de situar en un momento posterior el importe de una observación; sin embargo, si las mediciones se refieren a estados futuros, se nos hace difícil comprender, por ejemplo, qué puede significar la medición espectroscópica de la longigud de onda de un fotón, toda vez que éste no se halla ya presente después de haber sido fotografiado. Vemos que en la mecánica cuántica, sobre todo, es menester que mantengamos consecuentemente la referencia al estado *en,* o *antes de,* la medición.

KEMBLE [7], al pasar revista a numerosas mediciones posibles, utiliza un lenguaje que no es tal vez muy afortunado. Al distinguir entre mediciones predictivas y retrospectivas, pasa por alto consideraciones como las arriba expresadas y establece una barrera artificial entre la mecánica clásica y la teoría de los *cuantos;* pero, si se las examina detenidamente, sus mediciones predictivas resultan no ser mediciones en absoluto, sino *preparaciones de estados,* pues carecen del único elemento que convierte a una operación en medición: la obtención de un número [8].

---

[7] E. C. KEMBLE: *The Fundamental Principles of Quantum Mechanics,* Nueva York, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1937.

[8] Un monocromador, o un cañón de electrones, prepara un estado; y sólo cuando se le une a un instrumento absorbente funciona como instrumento medidor.

18.5. La compatibilidad de las mediciones

El principio de incertidumbre pone en correlación la "dispersión" en un colectivo de mediciones de posición, colectivo formado cuando un sistema se halla en un estado especificado de la más exacta manera mecánico-cuantista (por medio de una función φ), con la dispersión de las mediciones del impulso de ese mismo estado. Si, por ejemplo, se elige el estado de modo que todas las mediciones den lugar al mismo valor para la posición del sistema (estado propio de X), la determinación del impulso proporcionará valores que irán desde $-\infty$ hasta $+\infty$, sean cualesquiera los medios por los que se logre la medición e independientemente de si es realizada sucesivamente muchas veces sobre un solo sistema que se encuentre en este estado o si se realiza una sola vez sobre un gran agregado de sistemas similares, todos en ese estado. En ninguna parte, sin embargo, sugiere el principio con precisión lo que pueda esperarse de una ***única*** medición, de la clase que sea; la razón de ello estriba en que la idea de probabilidad, tal como la emplean los que trabajan en la física cuántica, no presenta un perfil subjetivo o apriorístico, sino que está fundamentada en *frecuencias.*

Si no se sabe nada acerca del estado de un electrón y hacemos *una sola* medida de su posición, utilizando, por ejemplo, un microscopio de rayos gamma, no podremos inferir absolutamente nada acerca del resultado que probablemente proporcionase una medición del impulso; si se realizan cien mediciones de posición, todas las cuales demuestren que el electrón se halla en el mismo lugar, puede esperarse con bastante certidumbre que cien mediciones de impulso darán lugar a resultados sumamente distintos, pero tampoco puede decirse nada acerca del resultado de una sola medición de P; y si cien mediciones de posición no presentan uniformidad alguna en sus resultados, podemos indicar con razonable certidumbre, no cuál será el resultado numérico de la primera medición de P, sino que tendrá aproximadamente el mismo valor que los de otras cien mediciones.

Cualquiera que sea el estado de un electrón, toda medición de posición realizada sobre él proporcionará un número, cosa que es igualmente cierta para toda medición de impulso. Si se mide X, puede realizarse, sin embargo, una sola medición de P, que dará como resultado una respuesta numérica clara si las condiciones se han dispuesto adecuadamente: en ningún caso puede suponerse que ocurra ningún efecto oscurecedor de una observación sobre otra. En efecto, nada nos impide medir X y P casi tan simultáneamente como queramos o como las complicaciones instrumentales de tipo puramente clásico nos lo permitan; así, pueden utilizarse simultáneamente dos microscopios, uno que emplee rayos gamma, y el otro ondas de una longitud conveniente, mayor, uno para localizar el electrón y el otro para determinar su posición; y es posible, con suerte, lograr ambas cosas, pues no existe ninguna ley de la mecánica cuántica

(ni ninguna otra consideración física de importancia) que prohiba básicamente el éxito de esta doble medición. Si la repitiéramos, los valores de x y p se dispersarían de acuerdo con el principio de incertidumbre. Naturalmente, nadie diría después de tal par de mediciones que sabe con precisión cuáles son x y p, del mismo modo que no diría después de una medición de X que conoce la posición del electrón: la primera afirmación es ilícita, no porque contradiga el principio de incertidumbre, sino porque, como la segunda, contradice el significado mecánico-cuantista de estado físico.

Hay autores [9] que, reacios a trastornar la confianza de sus lectores en las pintorescas nociones de partículas duras y determinadas en movimiento, han originado mucha confusión, ofendiendo su sensibilidad lógica con una argumentación descuidada. Así, la ambigua palabra *incompatible* se utiliza a menudo para caracterizar mediciones simultáneas de observables conjugados; pero, como hemos visto, tales mediciones son compatibles en el sentido de ser realizables y de dar respuestas exactas. Cierto que 100 mediciones que produzcan el mismo p son incompatibles con 100 mediciones que produzcan todas el mismo x (excepto por un capricho de la estadística), pero no es éste el sentido que aquí se insinúa con la palabra incompatible cuando se la utiliza sin matizaciones. KEMBLE [10] no vacila en decir más claramente las cosas: su frase "la *imposibilidad* de hacer mediciones simultáneas exactas de las coordenadas cartesianas y de los componentes conjugados del momento lineal" ha de desorientar al lector que no escudriñe su meticulosa obra con suficiente cuidado para ver que su autor mezcla ideas distintas de medición (cf. la sección precedente) y distintas formulaciones de la probabilidad (cf. la sección siguiente).

18.6. MEDICIONES Y ESTADOS PROPIOS [11]

Suele decirse que cuando se hace una sola medición de un observable Q y se encuentra que el resultado es q, se *sabe* cuál es entonces el estado, se sabe que es ψ_q (el estado propio correspondiente al valor medido). Esto, de ser cierto, exigiría una fortuita, impredecible y súbita conversión de un estado φ antes de la medición en el estado ψ_q después de ella.

Teniendo en cuenta todo lo anteriormente expuesto, semejante interpretación suscita ciertas dificultades. En primer lugar, mediciones perfectamente buenas en la física atómica (así como en la biología y en las ciencias sociales) pueden "matar" o aniquilar un sistema, y cabe perdonársenos si nos negamos a ocuparnos de estados propios de entidades inexistentes. En segundo lugar, todo estadístico tendría derecho a acusar de absurdo al físico si tratáramos de construir una distribución de probabilidad (que una función de estado implica siempre) sobre la base de una única prue-

[9] Entre ellos incluso HEISENBERG y muchos de sus intérpretes.

[10] *Op. cit.*

[11] El contenido de esta sección es todavía objeto de debates y representa una concepción que no admiten todos los físicos. Los lectores interesados por la "interpretación ortodoxa" deben pasar por alto esta sección.

ba. Podría uno preguntar, en consecuencia, por qué puede ser mantenida todavía esta concepción.

Tal vez una razón sea la falta de disposición a abrazar consecuentemente la epistemología básica de la mecánica cuántica, o sea, a aceptar la irremediable latencia de los observables; otra razón puede ser cierta mala inteligencia de qué es lo que constituye una medición. La intensa influencia de estos dos errores, persuasivamente combinados, resulta clara en la siguiente argumentación, que se encuentra en la bibliografía de la física cuántica.

Se desea medir el *spin* o espín (esto es, el momento angular) de un fotón. En términos clásicos, el espín es simplemente la dirección de polarización del fotón. A tal efecto, interponemos en el camino del rayo de luz un analizador polaroide (suponiendo a efectos de la argumentación que no dé lugar a absorción alguna) o un prisma de NICOL; si el fotón atraviesa el analizador, sabemos que tiene que quedar polarizado en la dirección en que se haya dispuesto el eje del instrumento, y podemos, por tanto, considerar su paso como una medición; pero es cierto que si se colocara otro analizador en el camino del fotón, con su eje paralelo al primero, el fotón atravesaría también el segundo analizador y, de hecho, cualquier número de analizadores dispuestos con la misma alineación en el camino del fotón. ¿No es evidente, pues, que la primera medición ha producido un estado propio con respecto al espín, de modo que todas las mediciones subsiguientes den el mismo valor de éste que la primera?

El clasicista no reformado siente temblar la tierra bajo sus pies ante tales manifestaciones. Debemos, por ello, proceder con cuidado. Aun prescindiendo del hecho de que hablar acerca de que un fotón atraviesa el analizador 1 en un instante, el analizador 2 en algún instante posterior, etcétera, hiere brutalmente el espíritu de la mecánica cuántica, debemos observar que se ha pasado por alto algo más importante: ¿cómo sabemos que el fotón atravesó el analizador 1 si no lo sorprendimos en tránsito entre los dos discos polaroides? ¿En qué sentido, pues, es una medición la *conjetura* de que atravesó un nicol? Si tal conjetura se convirtiese en una medición insertando una cámara o un grupo de partículas que retrocediese (efectos COMPTON o DOPPLER), sería muy improbable que el fotón cruzase a través de ningún nicol más que el primero: el paso de un fotón a través de una sucesión de analizadores es un experimento mental, no una medición. Esta argumentación, por lo tanto, no logra en absoluto demostrar que una medición dé origen a un estado propio; en la concepción que mantenemos, ésta es la única conclusión adecuada que se puede extraer, y resulta además afortunada en vista de su sencillez.

Por otra parte, no existe razón por la que *algunas* mediciones no puedan también llevar a cabo la preparación de un estado, funcionando así de modo que originen un estado propio. El ejemplo frecuentemente citado se refiere a un electrón que pase sucesivamente a través de dos placas fotográficas, ennegreciendo en cada una un grano de plata. Las dos marcas de su paso se supone entonces que están muy juntas, y la primera puede

ser considerada como una medición del estado del electrón en un instante anterior a su paso a través de las placas; como tal, no hace su estado más determinado de lo que lo fuese antes, pero el primer paso puede considerarse también como preparador de un estado sobre el que la segunda placa ha de realizar una medición. Ese estado es realmente un estado propio del observable posición en el instante del primer paso, pero se difunde rápidamente al modo indicado en la ecuación 17.18.

Excepto por su tenor acusadamente clásico, no hay nada erróneo en este análisis. Pero si el lector tiene la impresión de que tanto la distinción que acabamos de hacer entre medición y preparación de estado como el cambio de descripción que entraña son artificiales, debemos considerar el siguiente punto. Supongamos que el electrón, mucho antes de su encuentro con ninguna placa, se hallase en un estado definido con respecto a la energía (o al impulso); esto exige que haya de permanecer siempre en ese estado, teniendo en cuenta la relación de incertidumbre entre energía y tiempo; y decir que una medición de posición *altera este estado* contradice a la suposición original y hace de la mecánica cuántica una teoría incoherente.

Como ya hemos puesto repetidamente de relieve, el carácter estadístico de la mecánica cuántica tiene por finalidad facultar a dicha ciencia para enfrentarse con situaciones en las que una única medición significa muy poco con respecto al estado de un sistema. Entre las razones de esta importante innovación figuraba el hecho mismo de que haya mediciones catastróficas, esto es, la necesidad en que se encuentra el físico de terminar su investigación en el instante de la medición. La argumentación que rechazamos olvida todo esto e insiste en "seguir la pista a las cosas", cuando toda la metodología de la mecánica cuántica concede libertad a la física para entregarse a tales intentos, demostrando a la vez que, de hecho, han de ser estériles.

No existe argumentación empírica clara por la que sea posible demostrar o refutar la tesis de que una medición convierte un estado φ en un estado propio ψ_q; hay, sin embargo, dos concepciones, distintas de las que aquí hemos examinado, que otorgan a la teoría de los "saltos incausales" que hemos criticado cierta validez (excepto en el libro de VON NEUMANN no se ha distinguido claramente entre una y otra, ni entre ellas y la concepción que aquí hemos presentado). La concepción 1 profesa la teoría subjetiva o apriorística de la probabilidad y, como corresponde a ello, en una función de estado no ve tanto un conjunto objetivo de atributos observables relativos a un sistema físico, como hacemos nosotros, sino una *medida de conocimientos* por parte del observador, medida que será subjetiva: el conocimiento ocupa bruscamente el puesto de la medición.

Desde luego, cuando esta actitud lógica se desarrolla consecuentemente, viola muchas ideas que se suelen admitir corrientemente y convierte, de hecho, la física en una rama de la psicología, mas permite la defensa de la teoría de los saltos incausales. Quien esto escribe ha profundizado

en el problema en otro lugar y ha examinado los pros y los contras de la teoría psicológica de la mecánica cuántica [12].

La concepción 2 no puede ser compendiada en unas pocas líneas. Implica una ampliación esencial de los axiomas que dan nacimiento a la forma normal de la mecánica cuántica, que son los que hemos presentado y utilizado. El formalismo ampliado (al que está consagrada la sección siguiente) difiere de la mecánica cuántica "ordinaria" (a la que hasta el momento se han limitado nuestras consideraciones) en los mismos aspectos en que la mecánica estadística difiere de la mecánica clásica. El lector fatigado no tiene necesidad de forcejear con él, ya que su uso ha sido muy restringido hasta el momento.

18.7. La teoría de Von Neumann de mezclas y casos puros

En las exposiciones precedentes, cuando se decía de un sistema que se hallaba en un estado φ se significaba con ello que se encontraba *con toda seguridad* en ese estado; esto, como sabemos ahora, es la máxima información que cabe aportar acerca de un sistema atómico, y corresponde a la situación clásica en la que están especificadas todas las variables de estado. Y no es necesario repetir que sólo consiste, naturalmente, en un conocimiento referente a distribuciones estadísticas de valores observados, siendo éste el óptimo de información alcanzable.

Pero en la mecánica clásica se encuentra uno también con interesantes ejemplos en los que el conocimiento no presenta este carácter óptimo y en los que, sin embargo, convendría poder efectuar algún tipo de predicción. Un caso así se presentaría si, en vez de conocer la posición y la velocidad de una partícula, se conociese solamente su velocidad; o, en vez de conocer exactamente su posición, cabe que la conozcamos solamente en cuanto a sus probabilidades. La mecánica estadística, con su temperatura y su entropía, se interesa por este tipo de situaciones. En todos estos casos, el defecto de determinación o de conocimiento se compensa superponiendo a las leyes del movimiento la teoría ordinaria de las probabilidades.

También en la mecánica cuántica puede no ser máximo nuestro conocimiento: en vez de estar seguros de que el estado de un electrón es φ_1, puede uno verse obligado a decir que es o φ_1 o φ_2, o que el electrón forma parte de un agregado de electrones (un grupo físico real de ellos, no un conjunto gibbsiano) de los cuales se sepa que la mitad se encuentran

---

[12] H. Margenau: *Phil. Sci.*, 4:337 (1937).
La pretensión de que los estados tienen significado objetivo y son independientes de lo que un observador concreto sepa acerca de ellos es, naturalmente, totalmente compatible con una de las principales tesis mantenidas en este libro, la tesis de que la descripción física nunca va más allá del ámbito de la *experiencia*. Cualquier cosa que uno analice es, en este sentido, parte de la propia experiencia, pero dentro de esta experiencia puede distinguirse el conocimiento de los verifactos de los verifactos mismos. La objetividad, como repetidamente hemos puesto de relieve, no pierde su significado.

en el estado φ_1 y la otra mitad en el estado φ_2. Cuando surge esta contingencia, vuelve a compensarse el defecto de determinación superponiendo a los axiomas de la mecánica cuántica la teoría ordinaria de las probabilidades.

VON NEUMANN[13] fue quien primero demostró cómo puede hacerse esto con gran elegancia matemática y de un modo que permite considerar la mecánica cuántica ordinaria como un caso especial del formalismo ampliado. Distingue al efecto el conocimiento submáximo del conocimiento máximo, y llama al estado incompletamente determinado, al que se refiere el primero, una *mezcla;* y se suele entonces denominar *caso puro* al estado caracterizado, como hasta ahora, por una única función de estado conocida con seguridad (es posible considerar el caso puro como una forma límite de la mezcla).

Para representar una mezcla de funciones de casos puros φ_1, φ_2, φ_3, etcétera, es preciso conocer las probabilidades[14] con que se presenten estos casos puros; las vamos a llamar w_1, w_2, w_3, etc. Esto nos conduce a construir una tabla como la siguiente:

TABLA 18.1

Función de caso puro	φ_1	φ_2	φ_3	...
Probabilidad correspondiente	w_1	w_2	w_3	...

Las φ no tienen por qué ser funciones propias de ningún observable conocido, pero cada una de ellas será una función bien definida de los argumentos oportunos del sistema. Si fuésemos ahora a construir una nueva función

$$\varphi = w_1\varphi_1 + w_2\varphi_2 + w_3\varphi_3 + \ldots$$

con la aparentemente razonable esperanza de que esto permitirá ampliar la teoría cuántica normal a este campo menos conocido, nos veríamos decepcionados, porque la aplicación de los precedentes axiomas conduce entonces a un absurdo total; de hecho, no hay modo de que una única función sometida a estos axiomas concuerde con la experiencia. VON NEUMANN, sin embargo, introdujo un método que funciona: a partir de una tabla semejante a la 18.1 construyó cierta matriz, conocida con el nombre de matriz estadística de la mezcla, y todos nuestros anteriores axiomas pueden ser vueltos a enunciar a base de esta nueva herramienta matemática; tanto los estados como los observables se convierten ahora en matrices; el valor medio de un observable, anteriormente dado por una integral (que hemos omitido en nuestra presentación) pasa a ser la huella del producto de dos matrices, etc., y la probabilidad de ob-

[13] J. VON NEUMANN: *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik,* Berlín, Springer-Verlag, 1929 [vers. cast. cit.].

[14] Ahora no es preciso exigir una interpretación frecuencial de las probabilidades; la teoría tiene sentido de cualquiera de ambas maneras.

servar cierto valor propio resulta ser lo que debería, a saber: la media ordinaria de las diversas probabilidades mecánico-cuantistas. Pero el rasgo más atractivo del sistema es el siguiente:

Cuando la mezcla se reduce a un caso puro, esto es, cuando todas las w, excepto una, son cero, la matriz estadística adopta una forma especial y muy sencilla: se convierte en lo que los matemáticos denominan una matriz *elemental* (aquélla cuyo cuadrado es igual a ella misma); y cuando se utiliza una matriz elemental juntamente con los axiomas nuevamente enunciados, estos axiomas se tornan idénticos a los antiguos. Tenemos, pues, aquí una ampliación de la mecánica cuántica que es útil para resolver problemas de la termodinámica cuántica, a la que VON NEUMANN aplicó con éxito su método.

Nos hemos embarcado en esta exposición de la teoría de la mezcla debido a su significación para la interpretación de las mediciones, significación que cabe resumir ahora muy brevemente si se nos permite omitir los detalles matemáticos. Se puede demostrar que, por lo general, *el estado de un único sistema que sea un caso puro al comenzar se convierte en una mezcla al efectuar una medición,* mezcla en la que las probabilidades de observar diferentes valores propios de un operador dado aparecen como probabilidades ordinarias y son iguales a las probabilidades mecánico-cuantistas que se computan sin la ampliación de VON NEUMANN. Esto, naturalmente, es decir exactamente lo mismo que decía el otro formalismo, más sencillo, si se aplica la interpretación que hemos propuesto: la medición destruye el estado como caso puro.

En cierto modo, la teoría de los "saltos no causales" queda también apoyada por esta conclusión, pues resulta ser verdad que la medición ocasiona un brusco cambio, si bien éste es de un caso puro a una mezcla; tal cambio no puede ser representado, en absoluto, por la teoría ordinaria, y, en particular, no es un súbito salto desde un estado puro (φ) a otro (ψ_a).

18.8. LA MECÁNICA CLÁSICA COMO FORMA LÍMITE DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

A todo lo largo de estas páginas hemos hecho hincapié en la continuidad del razonar científico desde la física clásica a la cuántica. Pero en lo que se refiere a los detalles, el lector ha tenido que dar por buenas muchas cosas: los axiomas del capítulo anterior no guardan semejanza con las leyes de la mecánica clásica; y ni el principio de incertidumbre ni la difusión de los paquetes de ondas tienen lugar alguno en el antiguo esquema. Tal vez parezca, por lo tanto, que la teoría cuántica versa sobre un conjunto de hechos que están sometidos a leyes enteramente diferentes. Esto, sin embargo, no es cierto; pues la mecánica clásica es la forma límite de la mecánica cuántica, forma que es válida con un grado elevadísimo de aproximación con tal de que se cumplan las dos *condi-*

ciones siguientes: *a*) la masa del sistema ha de ser grande; *b*) el ámbito del movimiento o el tamaño del sistema han de ser grandes. Pronto resultará evidente qué es lo que se entiende por grande; digamos, anticipándonos a posteriores resultados, que los objetos visibles ordinarios tienen masas y tamaños lo suficientemnte grandes como para hacer sobradamente segura una descripción clásica.

La primera cuestión que es preciso resolver surge al considerar el principio de incertidumbre de HEISENBERG. Este principio es, desde luego, verdadero para todos los sistemas; mas lo que implica para situaciones no atómicas se ve mejor al escribir la ecuación (18.1) apoyándose en velocidades más que en impulsos. Puesto que $p=mv$, siendo m la masa de la "partícula", esta ecuación puede ponerse en la forma

$$\Delta x \cdot \Delta v \geq \frac{k}{m}. \tag{18.7}$$

Ahora bien: la constante k tiene un valor de $1{,}06\times10^{-27}$ erg/seg; la masa de un electrón es $9{,}1\times10^{-28}$ g, y su ámbito de movimiento en un átomo es aproximadamente de 10^{-8} cm, magnitud que podemos adoptar aquí como medida aproximada de la incertidumbre de la posición, Δx. Obtenemos así

$$\Delta v \geq 10^{8} \text{ cm/seg.}$$

En otras palabras: la *incertidumbre en la velocidad del electrón es de unos 1 000 kilómetros por segundo,* que es una velocidad muy respetable.

También hay que valerse de la relación (18.7) para calcular la incertidumbre en el movimiento de objetos. Tomemos, por ejemplo, una piedrecita que pese 1 g. Su centro de gravedad, que es lo que aquí importa, puede fácilmente ser localizado con error menor de 1 milímetro; por ello, podemos tomar $\Delta x=0{,}1$ cm. Insertando estos valores, encontramos

$$\Delta v \geq 10^{-26} \text{ cm/seg.}$$

Este límite es tan pequeño que resulta sumamente indetectable; un objeto que se deslizase con una velocidad tan infinitesimal necesitaría un tiempo mucho mayor que la edad de nuestro universo para avanzar 1 milímetro. El efecto del principio de incertidumbre sobre movimientos directamente observables, es, por consiguiente, completamente despreciable. En términos más técnicos, al aplicarse a movimientos ordinarios las distribuciones de probabilidad a las que hacen referencia los estados de la mecánica cuántica, se reducen a formas aproximadas a la función delta del capítulo anterior, y, así, las probabilidades degeneran en certidumbres, o certidumbres virtuales.

Pero ¿y la difusión de paquetes de ondas tratada en la sección 17.8? Si la certidumbre que implica la función delta se desvanece en el tiempo a medida que la gráfica se extiende, la conclusión a que acabamos de llegar carece de todo interés. Para investigar esta cuestión vol-

vamos a la sección 17.8. La cantidad $\sqrt{d^2+(kt/md)^2}$ representa la anchura del paquete que se difunde en el instante t, siendo la anchura original d. Introduciendo valores numéricos hallamos:

a. Un electrón confinado dentro de un espacio $d=10^{-8}$ cms., doblará su anchura en 10^{-16} segs., que es aproximadamente el tiempo que necesita para atravesar una órbita de BOHR. En lenguaje llano, el electrón se "disuelve" en el espacio realmente con mucha rapidez [15].

b. Una partícula de masa 1 g, localizada dentro de $d=1$ mm, "doblará su anchura" en 10^{25} segs. Este es un lapso de tiempo cien millones de veces superior a la edad del universo. Podemos, por ello, decir que los sistemas de tamaño ordinario no se difunden en absoluto y no están impedidos de tener las propiedades de los cuerpos rígidos.

Hasta aquí todo marcha bien. Pero ¿se reducirán los axiomas de la mecánica cuántica a la ley del movimiento de NEWTON cuando las masas sean grandes? La contestación está dada por un teorema demostrado por KENNARD y por DARWIN [16], teorema que se expresa en forma sencilla en el anteriormente mencionado libro de HEISENBERG. La segunda ley del movimiento de NEWTON, la única de importancia aquí, afirma que

$$m\frac{d^2x}{dt^2}=F(x),$$

supuesto que $F(x)$ sea la fuerza actuante sobre una partícula de masa m situada en x. Comenzando con la ecuación (17.16), que representa al axioma 5, y aplicándola luego unas pocas y sencillas operaciones de cálculo, se llega al siguiente resultado:

$$m\frac{d^2\bar{x}}{dt^2}=F(\bar{x}).$$

Esta ecuación tiene la misma forma que la ley de NEWTON, pero la cantidad $\bar{x}$ que aparece en ella es la *posición media del paquete de ondas.* Ahora bien: hemos demostrado ya que el paquete de ondas es muy estrecho para masas y tamaños ordinarios (es ésta una consecuencia de la relación de incertidumbre, que se basa en los axiomas 1 a 4) y que es permanente en el tiempo (como consecuencia del axioma 5); por consiguiente, $\bar{x}$ en este caso se identifica con la posición clásica de la partícula. Difícilmente puede pretenderse una reducción más convincente de la mecánica cuántica a la clásica.

Si alguna duda queda respecto de la validez de la física clásica dentro

---

[15] Recordamos al lector que esto sucede porque el estado supuesto no es un estado propio del observable energía H: si lo fuese, el estado sería estacionario y no presentaría difusión alguna. La expresión que hemos empleado es tal vez demasiado pintoresca, pues está claro que el electrón no se disuelve ni se difunde a la manera de una gota de tinta en el agua: es la distribución probabilística; o sea, una curva como la de la figura 16.2, lo que se ensancha con el tiempo.

[16] E. H. KENNARD: *Zeits. f. Physik,* 44:326 (1927). C. G. DARWIN: *Proc. Roy. Soc.,* A117:258 (1927). HEISENBERG, *op. cit.,* págs. 36-37.

de su propio terreno, es probable que se refiera a la distribución de los valores observables regulados por el axioma 3, distribución que suele ser discreta. ¿Cómo puede el fenómeno de cuantización salirse de escena a medida que avanzamos hacia masas y tamaños mayores? En la física clásica están esencialmente permitidos todos los valores, mientras que en la teoría cuántica sólo lo están algunos; y esto parece paradójico.

Hemos preparado la respuesta a esta cuestión con el trabajo ya hecho. La ecuación (17.6), que es aplicable a una partícula libre en movimiento dentro de un intervalo l, indica que la separación entre niveles de energía es del orden de magnitud de k^2/ml^2; para un electrón (con $l=10^{-8}$ cms.), esta magnitud adopta el valor 10^{-11} erg, que es una cantidad manejable en comparación con la energía poseída por un electrón atómico; mas para una partícula de masa 1 g, confinada dentro de 1 mm, el nivel de separación es 10^{-52} erg, totalmente despreciable. Se ve así que las partes excluidas de la escala de la energía tienden a cero, y la cuantización se hace enteramente ineficaz. Aunque esto lo acabamos de mostrar solamente para un ejemplo, se obtiene un resultado similar para todos los demás ejemplos de cuantización; y en uno de los primeros tratados sobre mecánica cuántica puede encontrarse otro sencillo caso que ilustra esta reducción [17].

Acabamos de demostrar, pues, que la teoría cuántica puede pretender que es válida bajo todas las condiciones y dejar, sin embargo, a la mecánica clásica en una posición tal que le permita seguir trabajando al viejo estilo; pues esta última es la forma límite de aquella otra teoría más amplia, la forma en que la incertidumbre y la cuantización se ocultan en las espesas sombras de la imprecisión *ordinaria.*

Resumen

La *incertidumbre* o *indeterminación* en la mecánica cuántica es una consecuencia del cambio experimentado por la descripción, o explicación de los hechos de la naturaleza física, cambio que hemos descrito en el precedente capítulo; la incertidumbre surge de un desplazamiento fundamental en el significado de la realidad física. Sobre todo, no es un simple resultado del reconocimiento—por más que sea un reconocimiento acertado—de que ciertas operaciones no pueden ser realizadas: si bien la forma usual de tratar el tema tiende a hacer aparecer el principio de incertidumbre de Heisenberg como una proscripción de ciertos procedimientos experimentales o, en el mejor de los casos, como una tesis referente a limitaciones de la mensurabilidad, representa, de hecho, un alejamiento clásico de la manera habitual de acercarse a la realidad.

En el presente capítulo demostramos primero el principio de un modo general, utilizando los axiomas expresados en el capítulo XVII. Luego

[17] E. U. Condon y P. M. Morse: *Quantum Mechanics,* Nueva York, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1929, pág. 51.

estudiamos su específica influencia sobre las operaciones físicas mediante un examen de numerosos ejemplos; y descubrimos que la tan repetida frase "la indeterminación es debida a la interacción entre sistemas e instrumentos de medición" lo caracteriza muy insatisfactoriamente: a menudo puede demostrarse que así sucede, en efecto, pero cabe también interpretar el principio de modo que implique una actitud neutral con respecto a la naturaleza ondulatoria o corpuscular del sistema, como un fracaso de los intentos por ver imaginativamente entidades del microcosmos. Filosóficamente, puede decirse que el principio de incertidumbre es una manifestación de lo que se ha denominado el carácter brumoso de la Naturaleza.

El análisis de la incertidumbre depende sobre todo de lo que uno acuerde considerar como medición. Hemos consagrado a este problema una sección levemente polémica (la 18.4), y hemos indicado que los físicos hablan a menudo en términos un tanto vagos, confundiendo las mediciones con las operaciones físicas: de hecho, es frecuente tomar la simple preparación de un estado por una medición; pero el significado de la incertidumbre se hace más claro cuando se adopta una interpretación más restringida del acto de medir. La mecánica cuántica se parece a la biología por la necesidad en que a menudo se encuentra de *destruir* sistemas con el acto de medición, y es preciso extraer cuidadosamente las consecuencias de esta necesidad.

En la sección 18.8 hemos puesto de manifiesto que la mecánica cuántica "se reduce" a la mecánica clásica para sistemas de gran masa y/o sistemas que se muevan libremente, sin estar efectivamente confinados dentro de unos límites. Los cuerpos ordinarios de nuestra experiencia diaria cumplen estas condiciones; por tanto, es oportuno considerar la mecánica cuántica como la disciplina más general de las dos, la que adopta la forma de mecánica ordinaria en todas las circunstancias bajo las que se sabe que ésta es válida.

BIBLIOGRAFIA

De Broglie, L.: *Matter and Light*, Nueva York, W. W. Norton & Company, 1939 [ed. orig. y vers. cast. citadas].

Destouches, J.: *Traité de mécanique ondulatoire des sistèmes*, Hermann & Cie., París, 1936.

Kemble, E. C.: "Operacional Reasoning, Reality and Quantum Mechanics", *J. Franklin Inst.* 225:263 (1938).

Mariani, J.: *Les limites des notions d'objet et d'objetivité* ("Exposés de philosophie des sciences"), París, Hermann & Cie., 1937.

Schrödinger, E.: *Naturwiss.*, 23:807, 823, 844 (1935); también *Proc. Camb. Phil. Soc.*, 31:555 (1935).

CAPITULO XIX

LA CAUSALIDAD

19.1. Las causas totales y parciales

Las palabras *causa* y *efecto* figuran entre las que empleamos con mayor vaguedad. En otros lugares de este libro, cuando nos encontrábamos frente a un embrollo análogo de usos y buscábamos una iluminación total al respecto, nos volvíamos confiadamente hacia la ciencia, para que nos aclarara el significado adecuado de las palabras. Desgraciadamente, vamos a ver que la ciencia no proporciona ninguna ayuda en nuestra actual perplejidad, ya que causa y efecto no son términos primariamente científicos, pese a lo extendida que se halla la opinión contraria: la ciencia los utiliza con no menos variedad de significados que el lenguaje común, y, según puede observarse en seguida, las investigaciones matemáticas de la ciencia no los utilizan en absoluto. Así, pues, cuando los científicos hablan acerca de la causalidad no lo hacen como expertos que se mueven en un terreno técnico, como cuando examinan el significado de la fuerza, la energía, los enzimas o las mutaciones; en las páginas que siguen encontraremos abundancia de pruebas a este respecto [1].

La causalidad no presenta ningún problema si estamos dispuestos a aceptar la más indefinida de todas las posibles relaciones causa-efecto, a saber: la que habla de causas considerándolas simplemente circunstancias acompañantes de un suceso, proceso o cosa. En ese sentido más amplio, la pulmonía puede ser la causa de la muerte de una persona (aunque los enfermos se recuperan frecuentemente de esta dolencia), la atracción del sol la causa del movimiento de la tierra en una órbita elíptica, el escultor la causa de una estatua y el triángulo la causa del hecho de que la suma de sus ángulos sea 180 grados. Lo que estas proposiciones tienen en común es una referencia a una vaga relación entre dos situaciones, relación que apenas es otra cosa que ocasión para que digamos, retrospectivamente: de no haber sido por una (la causa), la otra (el efecto) no habría ocurrido. No se formula ninguna afirmación respecto a una sucesión *invariable* de la forma, siempre que se dé *A* se dará *B*, pues no es en absoluto cierto que todos los enfermos mueran de pul-

[1] Admitimos las destructivas consecuencias que esto implica con respecto al contenido del presente capítulo.

monía; ni tampoco significa, siempre que se dé *B* se dará *A*, pues los ángulos pueden muy bien sumar 180 grados aunque no estén en un triángulo. Tampoco la sucesión *temporal* entra en todos los casos, ya que la atracción del sol y el movimiento de la tierra son simultáneos. En cuanto al último ejemplo, el que se refiere a los ángulos de un triángulo, no manifiesta nada más que una implicación analítica. En su forma más vaga, pues (de la que son ejemplo las anteriores frases), la relación causal carece por sí misma de propiedades lógicas interesantes: es una mezcla de otras varias relaciones formulables más cuidadosamente, de las que se ocupan eficazmente las matemáticas y la lógica; pero no tenemos la intención de analizarlas ahora.

Vamos a buscar, por el contrario, la formulación más restrictiva del principio causal que no se despegue de la forma usual de hablar; y la restricción se deberá a que queremos establecer una relación que sea única y precisa, y que pueda ser mantenida por encima de toda controversia. La forma de encontrarla es, evidentemente, analizar una cantidad suficiente de diversas proposiciones causales aceptadas para descubrir lo que tienen en común, y formular luego este elemento común con el máximo de precisión. Naturalmente, no existe seguridad alguna de que este procedimiento no produzca alguna académica y caprichosa caricatura de lo que generalmente significan causa y efecto; queda a juicio del lector el aclarar si tal es la naturaleza de nuestros resultados.

Comenzamos con una lista de nuevas proposiciones, que reuniremos para someterlas a inspección y, más tarde, a un detenido escrutinio. Su orden refleja cierta finalidad, que se hará patente a medida que avancemos; y podrá observarse que queda fuera del esquema causal la relación de implicación lógica (deductiva): ello se debe a que desde el principio, nos comprometemos a no contar como causales las vinculaciones del tipo de las expresadas en los teoremas geométricos, pues de otro modo estaríamos perdiendo el tiempo con algo claramente conocido y analizado de otras maneras perfectamente adecuadas, y, por lo que al uso lingüístico se refiere, estaríamos confundiendo *razón* y *causa*. Veamos la lista:

1. La bellota es la causa de la encina.
2. El asesino Juan es la causa de la muerte de Enrique.
3. Al comienzo de la Feria Mundial de Chicago, de 1933, se concentró sobre una fotocélula un rayo de luz procedente de una estrella lejana, fotocélula que a su vez operaba un relé, etc. Se dijo entonces que la emisión de luz en las lejanías del espacio y del tiempo era la causa responsable de la apertura de la Feria Mundial.
4. El alcohol es la causa de un accidente de automóvil.
5. La fuerza es la causa del movimiento.
6. La superproducción es la causa de la depresión.
7. El movimiento de dos objetos hacia un punto común es la causa de una colisión.

Esta lista parece ser representativa de las varias maneras en que se usa actualmente la palabra *causa.*

Preguntamos primero: como elementos de la experiencia, como entidades, ¿qué son la causa (*C*) y el efecto (*E*)? En el ejemplo 1, tanto *C* como *E* son *cosas;* en el 2, *C* es una cosa particular (una persona) y *E* es un *suceso;* en el 4, *C* es una clase de cosas y *E* una clase de sucesos; en el 3, *C* y *E* son acontecimientos o sucesos. El ejemplo 5 es difícil de clasificar desde nuestro actual punto de vista, porque la fuerza puede ser un dato (sensación muscular) o una construcción interpretativa. En los ejemplos 6 y 7, tanto *C* como *E* son *fases temporales* de un proceso dado: superproducción y depresión son estadios en un continuo de cambios económicos, y el movimiento de un objeto antes de la colisión y esta misma son dos estados de un proceso de movimiento. Puede, pues, concluirse que las causas y los efectos, tal y como se los entiende comúnmente, pueden ser: *a) cosas* (cosas particulares o clases de ellas), *b) sucesos* o *acontecimientos* en puntos diferentes del espacio y el tiempo, o *c) fases* del mismo proceso continuo. Que nosotros sepamos, nunca se admite que la causa y el efecto sean datos sensibles inmediatos: no decimos que la percepción visual del rayo sea la causa de la percepción auditiva del trueno; por consiguiente, hemos eliminado los datos desnudos del ámbito de nuestra atención.

Conviene considerar ahora la cuestión relativa a la unicidad de la relación causal. ¿En qué casos sería lo más adecuado decir que la causa atribuida por la proposición es la única causa o la única significativa? Esto nos proporcionará un oportuno criterio para retener la versión más manejable de la relación causal.

Un poco de reflexión hace ver que siempre que causa y efecto sean *cosas* o *sucesos,* la relación será mínimamente única: en la primera proposición de nuestra lista, el abono, el sol y la lluvia son ciertamente factores causales, además de la bellota; en la segunda, si Juan es la causa de la muerte de Enrique, ¿por qué no lo serán la pistola o el arrebato de ira que dominó a Juan antes de hacer el disparo?; en cuanto al rayo de luz que causó, supuestamente, la apertura de la Feria, es un agente tan remoto que podrían haberse citado media docena de factores distintos como causas más próximas. Y así podríamos seguir en la lista hasta llegar al número 6. Aquí empieza uno a preguntarse si podría decirse que algún factor de la situación económica anterior a la depresión era su causa tan significativamente como el estado de superproducción; y tal vez podría destacarse más la relevancia causal de ese estado haciendo que la palabra *superproducción* incluyera varias otras anomalías económicas que generalmente acompañan a ese estado, tales como aberraciones de los precios de existencias y mercancías, bajos tipos de descuento y salarios bajos. En todo caso, indicando como causa el estado *entero* de los asuntos económicos precedentes a la depresión se tendría una probabilidad muy pequeña de equivocarse.

Pero esto puede parecer trivial, pues equivaldría a decir que la suma

total de todos los acaecimientos que precedan a un conjunto dado de sucesos es la causa del conjunto dado. Y, sin embargo, si dejamos fuera *algunos* sucesos anteriores, la causa no parece totalmente completa.

La sospecha de trivialidad que surge en este punto desaparece cuando observamos que en nuestro sexto ejemplo no nos referíamos al estado de todo el universo, ni siquiera de toda la nación, con anterioridad a la depresión como causa de ella: apuntábamos a una situación *económica* específica, en la que estaba involucrado, desde luego, un "sistema" llamado la economía nacional; ese sistema sufría cambios de estado, y se observaba que un estado caracterizado por la palabra superproducción precedía a un estado llamado depresión. En la medida en que el significado de estos términos sea claro y en tanto en cuanto el primero preceda invariablemente al segundo, su relación es causal; y la causalidad está entonces lejos de ser trivial.

En el séptimo caso de nuestra lista hemos presentado un ejemplo extremo de este específico significado de la causalidad. Cuando se le analiza completamente afirma que existe un sistema formado de dos partículas, sistema cuyo destino es independiente del resto del universo físico; y en la sucesión de estados a través de los cuales pasa existe uno, la convergencia de movimientos, que—según se pretende—precedería invariablemente al otro, el contacto de las partículas. El ejemplo, por ser tan simple, no reviste gran interés científico; gran parte de su importancia, sin embargo, proviene de la circunstancia de que sea posible escoger en el universo un sistema tan limitado y un par tan sucinto de estados para construir el enlace causal.

En resumen, pues, una causa se hace única cuando se refiere a una fase de un proceso que afecte a todo el sistema que se esté estudiando O, para decirlo con términos de nuestro análisis anterior, se hace única cuando se refiere al *estado* completo de un *sistema* físico.

La razón por la que la atribución causal de los primeros ejemplos de nuestra lista era algo indefinida estriba en que las causas no abarcaban una situación lo suficientemente amplia: eran lo que a partir de ahora denominaremos *causas parciales*. Para hacer visible la diferencia entre causas parciales y *causa total* consideremos de nuevo el ejemplo segundo. Juan, la pistola, la bala y la ira, son causas parciales; y la causa total es una situación que se puede describir de la siguiente manera: Enrique está vivo; Juan está lleno de ira y empuña una pistola cargada, etc. El efecto total sería: Enrique está muerto; Juan empuña una pistola descargada, etc.

Obsérvese también que un efecto total dado tiene un número infinito de causas totales distribuidas a lo largo de una sucesión temporal, pero sólo una causa total en un instante dado: cada fotograma de una película que represente el asesinato presenta una causa de las situaciones presentadas en los fotogramas posteriores.

Teniendo en cuenta principalmente que ningún análisis de causas parciales puede ser jamás único, el término *causa,* a menos que lo cuali-

fiquemos, significará en lo sucesivo en este libro causa total. No podemos hacer ninguna aportación al interminable debate acerca del problema causal a menos que se mantenga rigurosamente esta restricción [2].

De nuestra lista de ejemplos causales hay que extraer una última conclusión: todos ellos tienen en común que la causa precede en el tiempo al efecto.

Cuando se reúnen las conclusiones apuntadas hasta el momento, el principio de causalidad afirma lo siguiente: sean A y B estados completos de un sistema especificado en los instantes t_1 y t_2, siendo t_1 anterior a t_2; si se realiza A, B lo seguirá, con toda seguridad.

La verdad del principio no es evidente, de modo que puede ser falso: en efecto, puede suceder que no sea posible encontrar ningún sistema con referencia al cual quepa realizar el análisis causal; pues evidentemente, si nos vemos obligados a escoger el universo físico entero, o la totalidad de nuestra experiencia, deberíamos contar como fracasos nuestras investigaciones causales; o podría ocurrir que cierto sistema esté manifiestamente dado, pero que sea imposible definir un estado de manera causal. Mas si se dan estas circunstancias, y siempre que tal cosa ocurra, no abandonamos inmediatamente la descripción causal: tratamos, por el contrario, de redefinir los sistemas y los estados; por ello, si bien el principio tiene contenido positivo, aparece, sin embargo, desempeñando un papel de máxima metafísica, tal como quedó explicado en el capítulo V.

19.2. Historia del problema de la causalidad

La principal finalidad de la presente sección, que titulamos, muy impropiamente, "Historia del problema", es llamar la atención sobre el hecho de que este problema posee una larga e interesante historia, que difícilmente puede resumirse en un solo capítulo de un libro. Entre las obras más recientes, la de Cassirer [3] presenta una magnífica perspectiva, y el libro de Frank [4] conducirá al lector a través de esclarecedores estudios de las cuestiones más sutiles de la causalidad, tanto históricas como fácticas. El enfoque de Frank es fundamentalmente crítico: entendiendo la causalidad como algo que implica una información positivamente captable, y considerando que el principio de causalidad opera en el mismo plano que las leyes de la naturaleza, su libro trata de demostrar que

---

[2] Frecuentemente, una causa parcial puede convertirse en causa total sobreentendiendo *ceteris paribus*, como en la proposición: un cojinete suelto es causa de que el motor tenga un golpeteo. Lo que se quiere decir aquí es que el estado del sistema, el motor, es normal, excepto por lo que se refiere al defecto explícitamente mencionado; en tales casos, la descripción a base de causas parciales es, desde luego, perfectamente adecuada.

[3] E. Cassirer: *Determinismus und Indeterminismus in der modernen Physik*, Göteborg, Elanders Boktrykerie Aktiebolag, 1937.

[4] P. Frank: *Das Kausalgesetz und seine Grenzen*, Berlín, Springer-Verlag, 1932.

tal principio consigue muy pocas cosas que las leyes de la Naturaleza no puedan lograr y que, de hecho, es a menudo una herramienta muy roma para su uso científico en comparación con leyes especiales; y esta positiva actitud conduce a una conclusión un tanto negativa, la de que el principio carece de importancia. El presente análisis que admite con perfecta ingenuidad la función regulativa de la causalidad, salva gran parte de su utilidad en la esfera metodológica y termina con una *formulación específica* del postulado causal; se abre así a la censura o a la confirmación más efectivamente que los esfuerzos, predominantemente críticos, de muchos otros autores.

Quizá el enunciado más antiguo conocido del principio de causalidad en la ciencia occidental es el de DEMÓCRITO, que dijo: "Todaas las cosas que fueron, son y serán, están preordenadas por la necesidad." ARISTÓTELES trató el problema causal de forma más trabajada, distinguiendo entre sí las causas formal, material, eficiente y final; mas en esta ordenación cuatripartita vemos la fuente de no pocas confusiones, ya que el problema, cualquiera que fuese, se volvió incapaz de solución gracias a la disección de ARISTÓTELES, que concentraba la atención del filósofo sobre causas parciales, nunca únicas; además, deja de hacer hincapié en la característica de inevitabilidad, que es claramente inherente a la formulación de DEMÓCRITO y que forma parte esencial de la relación causal tal y como la entendemos actualmente.

Es característico de la concepción de ARISTÓTELES el hecho de que permita que tanto las causas como los efectos sean cosas, sucesos, fases de un proceso o procesos; esto es, que permita una promiscuidad que, como hemos visto, acompaña de modo natural a la elección de causas parciales. La tendencia así iniciada se continuó y amplió en la Edad Media y dio como resultado una proliferación de causas que ahora nos parece ridícula; pero ejemplifica algo que ya hemos señalado: que si se empieza a formar una lista de causas parciales, tal lista nunca será completa.

No podemos detenernos en la famosa exposición de HUME, salvo para apuntar un hecho o dos que la hacen memorable, aunque ya no sea aceptable. HUME no efectuó el paso desde la causa parcial a la causa total (que fue realizado más tarde, por personas más profundamente versadas en la ciencia natural y las matemáticas), ya que habla de la causa como de "un objeto precedente y contiguo a otro". Mas, a pesar de este defecto, cabe extraer una importante lección de su forma de tratar el problema: buscando causas y efectos dentro del terreno de lo inmediato, o lo más próximo posible a ello, HUME se convenció de que toda posibilidad de establecer una *conexión necesaria,* esto es, la inevitabilidad de la relación causal, resulta ser ilusoria; así, pues, no existe causalidad entre cuestiones de hecho, entre datos (como hemos indicado frecuentemente en capítulos anteriores de este libro); conclusión que permanece intacta aun cuando se pase de la causa parcial a la total.

Son importantes las aportaciones realizadas por KANT al problema de la causalidad, porque asigna un nuevo lugar a la relación causal: la

sitúa entre sus categorías, donde puede perfectamente alcanzar el grado de fiabilidad que siempre ha pretendido; y, como es bien sabido, evitó así el punto muerto de HUME, que llegó casi a destruir por completo el significado de la causalidad. KANT se equivocaba, ciertamente, al pretender que poseía una validez *a priori,* ya que a menudo se han hallado a merced de hechos contingentes relaciones científicas bien asentadas del tipo causal, y la causalidad misma se ha puesto en tela de juicio; pero más deplorable es el hecho de que KANT, pese a sus notables facultades analíticas, no se esforzase por aclarar el significado de la causalidad de forma que fuese accesible al tratamiento científico.

En la misma edición de la *Crítica de la razón pura,* se lee: "Todo lo que sucede (empieza a ser) presupone algo a lo que sigue de acuerdo con una regla"; pero nada se dice acerca de la naturaleza de la regla, y esta omisión hace completamente indefinida tal manifestación. Y tampoco el término *todo (alles)* tiende a corregir la confusión aristotélica. Este último defecto se subsana en la versión dada al principio de la segunda edición de la misma obra: "Todos los cambios ocurren de acuerdo con la ley de conexión entre la causa y el efecto"; mas tampoco está claro lo que entraña esta pretendida ley. Es significativo, sin embargo, el desplazamiento a los *cambios* e ilustra el temperamento de su tiempo, más analítico que el actual: reconoce las causas como fases de un proceso temporal, como causas totales, distintas de cosas o sucesos específicos.

La prueba más clara de este desplazamiento se encuentra en la formulación clásica del problema debida a LAPLACE, de la que vamos a ocuparnos ahora. Mas al hacerlo nos movemos también hacia otra fase de nuestra investigación; pues hasta ahora habíamos preguntado cuál era el significado de la relación entre causa y efecto, pero ya hemos asentado tal cosa de una manera cualitativa, y nuestro interés se proyecta hacia lo que puede denominarse el *principio* de causalidad, la afirmación de la validez general de la relación causal. En particular, tenemos que encontrar el significado preciso de la relación causal que haga verdadero el principio en casos científicos en los que se sepa que se cumple.

19.3. EL DEMONIO DE LAPLACE

Según LAPLACE, el principio expresa aquella cualidad de nuestra experiencia en virtud de la cual puede hacerse la siguiente declaración [5]:

> Una inteligencia que conociese en un instante dado todas las fuerzas actuantes en la Naturaleza, así como las posiciones momentáneas de todas las cosas de que se compone el universo, podría comprender en una única fórmula los movimientos de los cuerpos más grandes y de los átomos más pequeños, siempre que fuese lo

[5] LAPLACE: *Théorie analytique des probabilités.*

> suficientemente poderosa como para analizar todos esos datos. Para ella nada sería incierto; tanto el futuro como el pasado se hallarían presentes ante sus ojos.

La inteligencia aludida, que, según es de presumir, trasciende de las limitaciones humanas, ha sido llamada un *demonio.* Sea o no adecuada esta palabra, la utilizaremos en gracia a su brevedad.

El demonio ha sido un centro de disputas. Los positivistas se oponen enérgicamente a que se lo invoque para la solución de un problema científico y lo consideran como un *deus ex machina* que fuerza el problema de un modo antinatural: preferirían eliminarlo, y con la plena aprobación de la mayoría de los científicos. Mas el intento de hacerlo conduce a veces a otra posición extrema, que sostiene que la causalidad es *válida* cuando el *hombre,* o el *científico,* puede conseguir lo que LAPLACE pedía al demonio: la causalidad se convierte entonces en una cuestión de si el científico, conociendo el estado del universo en un instante dado, puede predecirlo para todos los tiempos; y puesto que la contestación a esto es evidente (ya que, ciertamente, no puede), el problema pierde interés. Por lo tanto, es preciso acabar más cuidadosamente con el problema demoníaco.

LAPLACE quería que su demonio fuese un gran matemático, uno que estuviese versado en *todos* los trucos de ese oficio; y lo presentó como árbitro ideal de la coherencia matemática de la situación expresada en la anterior cita, un árbitro calificado para pronunciar el juicio que da el matemático cuando dice: la solución de una ecuación existe. Este juicio tiene sentido aun cuando ninguna computadora de la tierra haya encontrado tal solución. Cuando se acepta esta interpretación, el criterio de causalidad es la existencia de una fórmula del mundo, tal como la contempló LAPLACE, y debe entenderse la palabra *existencia* en su estricto sentido matemático. Con esta interpretación, que era la que claramente pretendía LAPLACE, se evita la caída de todo el problema en lo trivial.

El demonio ha de tener conocimiento de las posiciones de todas las "cosas". LAPLACE conocía la mecánica newtoniana y, sin duda, entendía por posiciones de las cosas la disposición de las masas en el universo; la temprana fecha de su obra (1820) garantiza que no podía estar pensando en otra cosa, y, en efecto, el contexto de nuestra cita lo apoya: para él el universo era un agregado de puntos materiales, y el conocimiento poseído por su demonio era conocimiento del "estado" de este agregado en el preciso sentido en que el término quedó definido en el capítulo IX (incluye la posición y la velocidad de todo punto material, aunque la palabra velocidad no aparezca explícitamente en las frases de LAPLACE). Pero cuando el estado de semejante sistema mecánico está dado en un determinado instante, las leyes de NEWTON permiten su cálculo en todos los instantes; la mecánica es, por lo tanto, una disciplina causal, y la causa de un estado dado es el estado total en algún momento anterior: cada efecto tiene un número infinito de causas,

pero sólo una causa en cada instante. En cierto modo, la mecánica newtoniana es el modelo de las disciplinas causales en la interpretación de LAPLACE de la causalidad; y cuando se plantea la cuestión referente a la validez del principio causal a todo lo largo del universo físico, uno se pregunta, simplemente, si toda la ciencia física tiene la misma estructura formal que la mecánica.

Pero existen defectos en la versión laplaciana de la causalidad aun después de concederle el beneficio de esta comprensiva interpretación. En efecto, su apelación a todo el universo como el sistema del que se predica la causalidad hace surgir una dificultad, pues no sólo la posibilidad de encontrar una solución, sino incluso la existencia matemática de ésta, quedan puestas seriamente en cuestión cuando el número de partículas se hace infinito; y puede entonces resultar completamente ocioso hablar de causalidad. El remedio evidente para esta afección laplaciana es suavizar la formulación de su referencia a todo el universo y aplicarla a sistemas más pequeños.

Si no fuese por el importante hecho de que sabemos con frecuencia que hay sistemas finitos (en extensión y en cuanto al número de partículas constituyentes) que tienen un destino independiente del resto del universo, la causalidad sería un tema fútil: el que se pueda contar con "sistemas cerrados" finitos es un requisito previo para que la causalidad tenga verdadero sentido. En cuanto al significado de "cerrado" en este contexto, lo estudiaremos con más detenimiento en la sección 19.5; el lector puede pensar por ahora en alguno de los dispositivos mecánicos más sencillos (masa moviéndose en un campo gravitatorio, un péndulo, cualquier otro vibrador no amortiguado) o en el sol y los planetas como sistemas cerrados. Los sistemas que conservan la energía son siempre sistemas cerrados en el sentido que aquí empleamos.

Sin embargo, nunca se encuentran en la Naturaleza sistemas completamente cerrados, los cuales, por lo tanto, manifiestan el "ficticio" carácter de las idealizaciones. De ahí que sea práctica común acusar al objeto de la causalidad (y, por consiguiente, a la causalidad misma) de tener sólo una relevancia espúrea para la experiencia real; pero esta irreflexiva actitud arroja por la borda toda la ciencia física, olvidando que las teorías nunca se refieren directamente a lo inmediato, sino que requieren una interposición de reglas de correspondencia.

Todos los sistemas a los que puede ser aplicado el análisis son idealizaciones, circunstancia que proviene en parte de la complejidad y en parte de lo que hemos llamado la bruma de lo dado. Así, pues, admitir que los sistemas cerrados son idealizaciones no disminuye lo más mínimo su importancia, pues una idealización es aquello hacia lo que *pueden hacerse tender* los procedimientos físicos, y siempre hay medios para distinguir las idealizaciones propias de las impropias. Ya nos hemos ocupado anteriormente de todo esto, principalmente al tratar del problema de la convergencia externa (sección 6.5): por ejemplo, el olor de un átomo es una idealización impropia, la masa de un electrón, una ideali-

zación propia. Un sistema mecánico cerrado pertenece a la clase de las idealizaciones propias.

En manera alguna puede esperarse la aparición de sistemas cerrados sobre bases apriorísticas, sino que se debe a hechos contingentes tales como la rápida disminución de todas las fuerzas mecánicas al aumentar la distancia entre las partículas en interacción. Así, pues, la causalidad, en la misma condición que impone a la experiencia física antes de hacer una afirmación positiva, implica algo que está lejos de ser evidente; y lo que implica es que *existen sistemas cerrados.*

El otro defecto de la formulación laplaciana no es fácil de eliminar. Consiste en lo siguiente: la mera existencia de una fórmula del mundo no es suficiente para caracterizar la causalidad, sino que hay que exigir a la fórmula ciertas cosas especiales. Para ver esto consideremos un sistema de n partículas (a efectos de la presente argumentación no importa que el sistema sea cerrado o no). Cualquiea que sea su movimiento, la partícula *i-ésima* tendrá por coordenadas x_i, y_i, z_i, que serán funciones del tiempo t. Si ahora *suponemos que estas funciones tienen por lo menos dos derivadas,* todas las d^2x_i/dt^2, d^2y_i/dt^2 y d^2z_i/dt^2 existirán y serán también funciones de t; nada puede impedirnos, por lo tanto, escribir ecuaciones en la forma newtoniana

$$\frac{d^2x_i}{dt^2} = F_{ix}(t), \text{ etc.} \tag{19.1}$$

y estas ecuaciones constituirán una fórmula del mundo que, según es de presumir, sería aceptable para LAPLACE. Tal fórmula aparece no como una sola ecuación, sino como un grupo de $3n$ ecuaciones diferenciales, que ofrece ventajas matemáticas sobre una única y podría ser convertido en tal si así se deseara; además, su solución existe, porque ése fue nuestro punto de partida.

Las ecuaciones (19.1), sin embargo, dependían solamente de una suposición: que las coordenadas sean diferenciables dos veces, esto es, que el movimiento de las partículas sea continuo. ¿Se reduce entonces el principio de causalidad a la débil aserción de que *natura non facit saltus?*

19.4. CAUSALIDAD Y PREDICCIÓN

La respuesta más sencilla, y que a menudo dan los científicos, salva la situación igualando el determinismo, la concepción que afirma la validez de nuestro principio, con la capacidad humana para predecir. Hemos tocado ya esta cuestión, aunque no demasiado seriamente, y hemos indicado que, *de facto,* nadie puede predecir con exactitud; ¿diremos entonces que nuestro mundo es "aproximadamente" determinista?; ¿o hemos de ceder algo más y decir que la predicción exacta carece de importancia, ya que lo que cuenta es la *confianza* en nuestra capacidad final para predecir? Las anteriores sugerencias no son nada afortuna-

das, pues convierten la causalidad en algo muy mal definido, si no en una mera y vaga creencia acerca del curso futuro de la ciencia.

Por otra parte, antes o después tendremos que enfrentarnos con la cuestión referente a la *universalidad* del comportamiento determinista. Esto, en verdad, puede no ser más que una creencia, pues es claramente imposible demostrar una proposición acerca del universo basándose en los elementos de juicio proporcionados por los finitos conocimientos empíricos; pero si tal creencia se fundara en la certidumbre de que en algunas fases de la experiencia se cumple la causalidad, podría ser tomada en consideración como una razonable extrapolación de lo que sabemos. Solamente en este sentido puede aceptarse el determinismo, y hemos de descubrir que en la actualidad algunos campos de la ciencia han alcanzado la fase causal y otros, en cambio, no. Habiendo así limitado nuestro radio de acción, volvemos a la cuestión de si el determinismo equivale a la predecibilidad.

Desde luego, cabe definirlo de tal modo. Pero mucha gente, entre la que se incluye el autor, siente una rara sensación de algo incompleto con este drástico acabar con la cuestión, y su curiosidad sigue insatisfecha; quienes piensan así experimentan la sensación de que las raíces de la causalidad ahondan mucho más profundamente que el fenómeno de la predicción. Su intranquilidad resulta evidente, tal vez, merced al siguiente ejemplo imaginario.

Suele ser más difícil llegar a un acuerdo sobre cuestiones positivas que sobre cuestiones negativas; en el caso presente, quizá podamos esbozar más fácilmente una situación *no causal*. Parece que el modelo más claro de un universo no causal es un mundo gobernado por un dios irracional (o un diablo) de conformidad con deseos inescrutables. Si semejante mundo funciona suavemente, si sus cuerpos se mueven continuamente de un punto a otro, entonces, como hemos visto, satisface la sentencia de LAPLACE, y por esto es por lo que nos parece que ésta necesita ser corregida; ahora bien, si el universo no causal puede satisfacer también a los discípulos de la doctrina de la predicción, también esa doctrina tiene que ser mejorada antes de que pueda pretender definir la causalidad. Y para satisfacerlos suponemos que el diablo les hace saber, como a los profetas, lo que va a suceder cada día; ya pueden predecir, pero ¿se ha convertido el universo en causal?

Admitimos que el ejemplo tiene escasa fuerza lógica y que no convencerá al prediccionista. No se comete ningún error de razonamiento contestando afirmativamente a la última pregunta, pero se viola una arraigada sensación que distingue entre capricho y comportamiento causal y que considera los milagros, tales como la predicción profética, como síntomas de *in*determinismo.

La doctrina de la predictibilidad pone la carreta delante de los bueyes. Que la predicción tenga mucho que ver con la causalidad no es, desde luego, un accidente, pues si la causalidad se cumple, siempre es posible la predicción; pero nuestro ejemplo nos previene para que no

formulemos de modo inverso esta relación. La versión laplaciana debería habernos enseñado ya lo siguiente: la existencia de una fórmunla permite la predicción, pero la predicción (del tipo profético) no tiene por qué presuponer una fórmula. Nuestra opinión es que la causalidad representa algo más fuerte que la capacidad humana de predicción e intrínsecamente diferente de ella; en la sección siguiente estudiaremos qué es exactamente; ahora vamos a hacer primero claramente visible, una vez más, la distinción citada mediante algo más plausible que el diablo, al que hemos cogido por los pelos. Trataremos de encontrar una situación positivamente causal.

La gravitación universal era el prototipo de regularidad causal en el pensamiento de LAPLACE y es todavía el modelo para el pensamiento causal; no corremos, por tanto, riesgo alguno al proponer la ley de la gravitación universal como ley causal y las situaciones que regula como manifestadoras de determinismo. Según dicha ley, cada dos partículas de materia se atraen con una fuerza igual a kr^{-2}, siendo k un parámetro que incluye ambas masas atrayentes y r la distancia entre las partículas; esto proporciona una teoría que hace posible la predicción siempre que puedan resolverse ciertas ecuaciones diferenciales[6].

Ahora bien, la ley contiene dos constantes, k y -2 (la palabra *constante* implica aquí invariabilidad con respecto al espacio y al tiempo). POINCARÉ llamaría a la primera constante accidental, porque puede cambiar de un caso a otro, dado que depende de las masas de las partículas; pero la segunda es una constante esencial, invariable en todas sus aplicaciones.

Lo que queremos tener a la vista es una situación en la que la constante esencial, -2, quede sustituida por un número igualmente constante con respecto al espacio, pero variable en el tiempo, por ejemplo de manera periódica. Si esto fuese cierto no dudaríamos en buscar una causa (parcial) de esta variación, quizá bajo la forma de un cuerpo astronómico que se acercase y retrocediese respecto de la tierra con el período observado en la fuerza gravitatoria, o tal vez en la forma de un universo en contracción y expansión alternativas; pero supongamos que no se encuentren tales efectos concurrentes y que nos veamos obligados, quieras que no, a reconocer que la "constante" de la ley de la gravitación universal fluctúa. Si la ley de fluctuación es conocida, seguirá siendo posible la predicción; sin embargo, en la teoría que vamos a presentar habría que decir que la causalidad falla en estas condiciones.

19.5. LA CAUSALIDAD COMO INVARIABILIDAD TEMPORAL DE LAS LEYES

De la pared de una habitación en un laboratorio de física cuelga un reloj de péndulo. El ocupante de la habitación le da cuerda a intervalos

[6] En general, no es éste el caso cuando el número de partículas es mayor de dos. Por ello, si *de facto* la predicción fuera la condición necesaria de la causalidad, el movimiento de tres cuerpos sería movimiento no causal.

adecuados, pero descubre que funciona erráticamente; al cabo de algún tiempo se le despierta la curiosidad, y decide llegar hasta el fondo del curioso comportamiento del reloj: sospecha que éste no es un "sistema cerrado", que algo para él desconocido le está sucediendo.

La primera cosa que descubre es un radiador próximo, que está encendido durante el día, pero apagado de noche. Una cuidadosa observación indica que el reloj se mueve más deprisa cuando la habitación está caliente que cuando está fría, y tarde o temprano llega a la conclusión de que el aceite utilizado para lubricar la maquinaria reduce de noche la marcha del reloj a causa de su gran viscosidad. El ocupante decide, por tanto, mantener el radiador encendido durante la noche.

Pero el reloj sigue sin marcar la hora exacta. Parece tener súbitos cambios de ritmo durante el día, cambios no relacionados con nada que suceda en la habitación. No pasa mucho tiempo sin que nuestro amigo recuerde que en el piso de abajo hay un ciclotrón, aparato que hasta el momento había considerado como una amenaza sólo para su salud; y descubre ahora que es también responsable de aquella perturbación: cada vez que se enciende o se apaga el electroimán del ciclotrón afecta a los engranajes del reloj, y deja además en la maquinaria una magnetización residual que suprime la uniformidad de su marcha.

Nuestro amigo, más decidido ahora que nunca, hace desmagnetizar el reloj y lo lleva a otra habitación, muy alejada de la influencia del electroimán y a temperatura constante. De vez en cuando entra en la habitación y toma nota cuidadosamente de la hora que señala, pero, con gran asombro suyo, la marcha del reloj sigue siendo errática. Sin saber ya casi qué hacer, comenta su notable experiencia con el vigilante del laboratorio, el cual admite con cierta turbación que él también se ha sentido interesado por el reloj, que le gusta hurgar en él y que, de vez en cuando, le ha corregido la hora.

Esto parece resolver el misterio, pero la historia prosigue. Se coloca el reloj en una habitación a temperatura constante, en lo alto de una torre del laboratorio, lejos de toda fuente imaginable de perturbación; la habitación se cierra con llave, siendo accesible solamente a nuestro amigo. Mas el curso del reloj sigue siendo errático: a veces va a doble velocidad que la normal, a veces mucho más lentamente; no había modo de hacer nada que lo obligase a funcionar coherentemente.

En estas circunstancias, el físico llega a la conclusión de que el reloj era un sistema cerrado: su comportamiento carecía por completo de toda relación con nada que sucediera fuera de él; pero también llega a la de que desafiaba al principio de causalidad. Puede además recordarse que se volvió loco de remate después de extraer esta última conclusión, pero nuestra historia termina oficialmente antes de este incidente.

Todo esto hace ver dos cosas: *a*) el significado de los sistemas cerrados; *b*) el fallo de la causalidad. Nuestra tarea es ahora invertir la situación negativa y formular el significado positivo del determinismo. La

proposición de LAPLACE, aunque limitada a los sistemas cerrados, no excluye al aberrante reloj.

Si el movimiento del reloj se describiese por las leyes de la mecánica en su forma usual, los coeficientes (masas y fuerzas) que aparecen en ellas serían funciones del tiempo. Escritas simbólicamente, las leyes del movimiento serían

$$f\left(\frac{d^2x}{dt^{2'}}\ \frac{dx}{dt'}\ x, t\right) = 0, \tag{19.2}$$

en donde x representa cualaquiera de las coordenadas (o todas) de las partes en movimiento, t es el tiempo y f designa una función continua. La presencia de la primera derivada dx/dt, puede hacer no conservativo el sistema (pierde entonces energía a medida que pasa el tiempo), pero lo deja cerrado en nuestro sentido. La ecuación (19.2) es una ecuación diferencial de segundo orden con t como variable independiente.

Un reloj de buen comportamiento, esto es, un causal, satisfará una ecuación como (19.2), *pero sin que la variable t aparezca en el paréntesis:* los coeficientes que aparecen en las leyes del movimiento no serán funciones del tiempo. Aquí tenemos, pues, el eslabón perdido cuya ausencia hacía a la teoría laplaciana definir la mera continuidad y no la causalidad. Pero antes de dedicarnos a ello examinemos lo que implica la explícita omisión de t de una ecuación diferencial tal como (19.2).

Es simplemente esto: la ecuación es invariante con respecto a la sustitución de t por $t - t_0$, supuesto que t_0 sea una constante. En lenguaje menos matemático: cualquier movimiento que satisfaga las leyes del movimiento en el tiempo t las satisfará también si tiene lugar en un tiempo $t - t_0$; o sea, el comportamiento hoy observado de un sistema es el mismo que su comportamiento mañana o en cualquier otro instante, con tal de que el sistema se ponga en marcha bajo las mismas condiciones iniciales. El exponente en la ley de la gravitación universal no es una función de t que varíe, por ejemplo, entre $-1{,}9$ y $-2{,}1$, y ésta es la razón por la que el movimiento de todos los cuerpos astronómicos es independiente de la era absoluta en que ese movimiento tenga lugar. La ausencia de t en la ecuación (19.2) es lo que consideramos como la esencia del principio de causalidad: esta versión traduce la usual proposición "siempre que se dé A se dará B", en términos más fiables sin modificar su crucial significado; en esta forma el principio proclama una especie de coherencia de la naturaleza que supone que permanece fiel a sus propios precedentes.

La causalidad se mantiene si las leyes de la Naturaleza (ecuaciones diferenciales) que gobiernan los sistemas cerrados no contienen la variable temporal en forma explícita. Las leyes de la Naturaleza se entienden en el sentido explicado en el capítulo VIII, y es preciso no confundirlas con las ecuaciones del movimiento, para las que no es verdadera la anterior proposición. En la mecánica de partículas, donde se originan la mayoría de las precedentes consideraciones y donde se halla claramente la

raíz histórica del principio causal, las leyes de la Naturaleza son ecuaciones diferenciales de segundo orden, y las ecuaciones del movimiento, sus soluciones (con valores iniciales asignados de x y v). Más adelante veremos las cuestiones acerca de hasta qué punto es pertinente este principio y es verdadero en campos distintos del de la mecánica. Primero es conveniente detenerse un momento a considerar algunas de las cosas indicadas y sugeridas por el enunciado formal a que hemos reducido ahora la causalidad.

19.6. La necesidad causal, etc.

Con respecto a las causas *parciales* el principio dice exactamente lo que comúnmente se entiende por él, a saber: que si todos los demás factores causales permanecen constantes, una causa parcial dada produce siempre el mismo efecto. Los "demás factores causales" son, simplemente, los determinantes del estado total, que permanece inespecificado. Al considerar el movimiento de un cuerpo, uno podría sentir la tentación de decir: "la causa de que esté ahora en el punto P es el haber estado un segundo antes en el punto Q"; pero esto se refiere solamente a una causa parcial, y esta declaración es significativa solamente si añade "supuesto que la velocidad sea de dieciséis kilómetros por hora en cierta dirección", pues el estado de un cuerpo en movimiento implica que sepamos tanto la posición como la velocidad.

Cuando las variables que determinan un estado (esto es, las causas parciales que componen la causa total) son desconocidas, el principio se aplica siempre corriendo el riesgo de alguna imprecisión, pues ni siquiera una apelación a la constancia de factores causales inespecificados servirá de nada si se desconocen esos factores. Sin embargo, ésta es casi siempre la situación con que nos encontramos al aplicar el razonamiento causal a las cuestiones de la vida cotidiana. Pero lejos de maldecir este hecho, lo registramos, simplemente, junto con su principal significación: que es inútil esperar precisión en las controversias causales sobre la mayoría de las cuestiones prácticas, incluyendo las cuestiones de conducta y las cuestiones de Derecho.

¿Produce siempre el mismo efecto una causa dada? ¿Y un efecto dado, es producido siempre por la misma causa? Si el estado B es la solución de una ecuación diferencial para la que el estado A proporciona un conjunto completo de condiciones iniciales, los dos están vinculados inflexiblemente: B estará determinado exactamente por A, y A por B; y la restricción que haríamos a las causas totales estaba motivada por el deseo de alcanzar esta vinculación única. Para ver en un sencillísimo ejemplo por qué las causas parciales y los efectos no son únicos, volvamos al ejemplo del cuerpo que se mueve desde Q a P: a menos que su velocidad en Q esté especificada, la posición en Q hace un segundo no es la única que da como resultado su actual posición en P; e, inver-

samente, si se nos dice simplemente que el cuerpo estaba en Q hace un segundo, no podemos deducir nada respecto a su actual posición.

Se precisa una mayor cautela si se quiere garantizar la unicidad: no sólo debe estar dado el estado completo, sino que es preciso mantener intacto el sistema completo a todo lo largo de todas las consideraciones causales. En el ejemplo anterior el sistema era un cuerpo o (para ser completamente definidos) digamos que una partícula; y el efecto era que la partícula tuviese una posición P y una velocidad v en el momento t_p. Estas asignaciones son únicas sólo en tanto en cuanto la partícula no se halle sometida a fuerzas, pues quedan frustradas al introducirlas; y éstas, si están presentes, deben, por lo tanto, quedar incorporadas al sistema, y debe uno hablar de una partícula sometida a la gravedad, o de una partícula vibratoria con cierta fuerza de restitución, o de una partícula que se mueve libremente, etc., para especificar el sistema. En situaciones más complejas tiene que guardarse parecido cuidado: podríamos decir, volviendo a uno de nuestros anteriores ejemplos, que la muerte de Enrique es el efecto, no sólo de todas las circunstancias visibles enumeradas—el que Juan estuviera donde estaba, empuñara una pistola cargada, etc.—, sino también del hecho de que él y Enrique estaban enamorados de la misma mujer; pues así como en el ejemplo físico el sistema, para quedar plenamente especificado, implicaba una referencia precisa a fuerzas, así el sistema de Juan y Enrique de que ahora hablamos exige para su completa definición la expresión de sus fatales afectos. Pero estas analogías tienden a ser artificiales, porque los conceptos de sistema y estado, tan fundamentales en los precisos y completos juicios causales que son posibles en la ciencia, suelen estar mal definidos.

La *necesidad* que vincula la causa y el efecto salta ahora por sí sola a la vista: no es un atributo peculiar del nexo causal, misterioso, poderoso e inexorable (aunque en un sentido puramente fáctico todos estos adjetivos le son aplicables); la cuestión es, simplemente, que hemos encontrado una forma de describir nuestra experiencia que hace que la relación entre dos estados separados en el tiempo sea única (uno implica al otro) e invariable (se mantiene siempre la misma implicación). La fuerza del principio de causalidad es metodológica, proviene de nuestro éxito en el análisis: el principio es una lección extraída de los procedimientos científicos constructivos y continuamente reintroducida en ellos; eleva las regularidades expresadas por las leyes de la Naturaleza a un plano superior de generalidad, pero no las hace más ciertas ni más seguras.

La idea de causalidad ha sufrido una transformación no muy distinta de la experimentada por otros conceptos científicos, cambio que tal vez esté óptimamente ejemplificado por la idea de *fuerza*. Incluso hoy día muchos científicos conciben las fuerzas primariamente como empujes y tirones transmitidos por contacto entre cuerpos: la palabra trae a las mientes una especie de accionamiento muscular. Este pintoresco complemento de los conceptos científicos es agradable, porque imprime una cualidad poética a agentes dinámicos inanimados tales como, por

ejemplo, el agua que hace girar una rueda de molino o la máquina que arrastra lentamente cuesta arriba un tren de mercancías. En estos casos añade un inofensivo elemento imaginativo; pero impide una apreciación correcta de influencias abstractas tales como la fuerza de la tierra sobre la luna, de un imán sobre el hierro o de la llamada "fuerza de CORIOLIS": aquí es preciso despojar a esta idea de sus sugerencias domésticas, purgarla de antropomorfismo y asentarla sobre una base más amplia. De manera análoga, toda la ciencia moderna tiende hacia lo general y abstracto, como ya hemos indicado.

También la causalidad fue considerada originariamente como un empuje detrás de los acontecimientos o como un agente que sale al encuentro del destino: obligación dinámica era el término gráfico que expresaba la acción causal, y la necesidad era su modo (en cierta manera, la necesidad significaba algo más que unicidad e invariabilidad). Este sentido se está perdiendo ahora, y la causalidad se ha transformado en un componente *metodológico* de la comprensión científica.

Hemos afirmado que el principio de causalidad, cuando se lo presenta en la restringida formulación que hemos propuesto, no es tautológico, sino que puede ser contradicho por la experiencia científica. Esto es lo que ocurriría si las llamadas constantes de la naturaleza cambiasen en el tiempo. Nadie puede excluir de la consideración esta posibilidad: DIRAC ha propuesto leyes de la naturaleza cambiantes, que recientemente han encontrado una poderosa defensa en una fascinante y bien documentada conjetura de PASCUAL JORDÁN[7], quien presenta pruebas de una declinación de la fuerza de gravitación y de un aumento en la masa total del universo merced a la generación espontánea de estrellas; sus leyes físicas incluyen la edad del cosmos de modo intrínseco y son susceptibles de confirmación. Si estas sugerencias demostraran ser correctas sería menester rechazar o someter a revisión el principio de causalidad en su forma actual.

Quedan aún por recibir respuesta varias cuestiones relacionadas con la ecuación (19.2) y con la expresión verbal del principio dada en la sección anterior. Decíamos allí que la ecuación (19.2) define la causalidad cuando el argumento explícito t no aparece en la función f; y en la formulación verbal hablábamos de leyes de la naturaleza en forma de ecuaciones diferenciales. ¿Existe alguna restricción referente al orden de estas últimas?

En la mecánica de partículas las ecuaciones son de segundo orden, y tal mecánica es, como hemos visto, un modelo ejemplar de todas las disciplinas causales; pero si estipulásemos que las leyes causales han de ser siempre de segundo orden, veríamos que la mecánica sería casi la única disciplina causal. Tal restricción es, por lo tanto, excesivamente drástica: admitir ecuaciones de primero y segundo orden ensancha

---

[7] P. JORDAN: *Die Herkunft der Sterne*, Stuttgart, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, 1947. En la teoría de la relatividad de E. A. MILNE, los fenómenos son causales en una escala temporal, y no en otra.

el ámbito lo suficiente como para incluir prácticamente todas las ramas de la física; pero nos hace preguntarnos si podría decirse que el uso de ecuaciones de tercer orden, caso de que resultase necesario, derrotaría a la causalidad. Una restricción en el orden de las derivadas parece artificial y ajena al significado que expresa el término *causa*[8].

Por otra parte, si no se impusiera ninguna restricción, la causalidad perdería, ciertamente, la significación que tiene, pues una ecuación como (19.2), aunque t esté explícitamente presente, puede finalmente quedar reducida a una de forma causal mediante un número suficiente de diferenciaciones. De ahí que, a menos que el orden esté limitado, la descripción causal pueda lograrse siempre.

No existe manera de evitar este dilema, excepto confiar en la práctica científica real: los hombres de ciencia no aceptan una ley de la naturaleza que implique derivadas de un orden arbitrariamente alto; si se vieran obligados a emplear ecuaciones diferenciales de orden elevado, se sentirían incómodos y buscarían todas las posibilidades de eliminar esta complicación; pero si su búsqueda fuera vana, las ecuaciones de orden elevado se convertirían en leyes causales aceptables. Es aconsejable, por lo tanto, y perfectamente adecuado, no formular ninguna restricción en cuanto al orden, excepto en el sentido de que debe ser razonablemente pequeño.

Si las ecuaciones diferenciales independientes del tiempo para sistemas cerrados implican la causalidad, ¿qué decir de los sistemas abiertos? Admitir que un sistema es abierto hace inaplicable nuestra formulación restringida, pero deja sin decidir la cuestión de su comportamiento causal, pues el sistema puede formar parte de otro mayor y causal. Así, cuando se escribe la ley del movimiento de un oscilador sometido a una fuerza impulsora externa, la fuerza aparece como función del tiempo, y la ecuación resultante viola nuestra definición del comportamiento causal; pero el sistema es abierto, y la definición no es aplicable; y si el mecanismo impulsor queda incluido en la descripción, desaparece la explícita dependencia de t: todo el sistema es cerrado y causal.

19.7. La causalidad, las leyes de conservación y la relatividad

En el capítulo V, en el que introdujimos el grupo de principios metafísicos entre los que se encuentra el de causalidad, preveníamos contra la confusión de estos principios con claros receptáculos para conocimientos específicos: la ciencia es una empresa que desafía a las clasificaciones estáticas, y sus problemas se solapan siempre unos con otros. En ninguna parte se ve esto más claramente que en el presente problema: la causalidad comprende muchas cosas, hace posibles ciertos tipos

[8] Se obtiene una ecuación de cuarto orden cuando la ley del movimiento para oscilaciones acopladas se escribe apoyándose en un único desplazamiento. Los físicos no han puesto en cuestión la causalidad a la vista de esa circunstancia.

de descripción científica que también se conocen por otros nombres y está implicada por muchas leyes específicas; no puede decirse, sin embargo, que sea idéntica a ninguna de ellas. Y debido a que en la ciencia siempre hay ocasión de designar un caso específico de la relación causal con otro nombre, los científicos no se sienten obligados a apelar a ella directamente, y a veces desdeñan su uso como algo vago.

La causalidad es pariente próximo de las leyes de conservación de la energía y del impulso, y también del principio de relatividad. Podría decirse que es madre de la primera ley y hermana del último.

Por lo que se refiere a las leyes de conservación, surgen del modo que sigue: una ecuación del tipo (19.2) en la que falte t posee un "factor integrante": la multiplicación por este factor convierte al primer miembro en una diferencial perfecta [9]. Su integral es entonces una constante, que recibe nombres tales como los de *energía* o *impulso* [10]. Si el movimiento tiene lugar en más de una dimensión, de modo que las magnitudes y, z, dy/dt, d^2y/dt^2, dz/dt, d^2z/dt^2, etc., aparezcan también en F, las cosas no son tan sencillas: la ausencia explícita de t no es entonces condición suficiente para que existan las integrales propias (integrales que sean funciones de punto), y deben cumplirse otras condiciones; pero el físico las conoce perfectamente, y no es preciso que insistamos ahora sobre ello.

Lo que hemos demostrado es lo siguiente: la estructura causal de las leyes de la naturaleza es siempre una de las condiciones que conducen a las leyes de conservación, si bien la cantidad física exacta que se conservará sólo puede determinarse cuando se conozcan las leyes mismas. Es erróneo decir que el principio de causalidad afirma simplemente la existencia de leyes de conservación: causalidad y conservación no son equivalentes, sino que la primera es una condición necesaria de la segunda; es un enunciado más débil y radica más profundamente en la estructura metodológica de la ciencia natural. Si se quieren más pruebas en favor de la concepción según la cual la causalidad *no es equivalente* a la conservación, podemos recordar lo que hace la física con los campos "no conservativos": continúa su descripción causal (nadie pre-

---

[9] Es bien sabido que una ecuación de segundo orden en la que la variable independiente no aparezca explícitamente puede siempre ser reducida a otra de primer orden mediante la sustitución $dx/dt=p$, $d^2x/dt^2=p(dp/dx)$; ahora bien, toda ecuación de primer orden es integrable.

[10] Los ejemplos más conocidos de este procedimiento son la deducción del principio de energía en la mecánica y en la electrodinámica. En la mecánica se comienza con la segunda ley de NEWTON, $m\ d^2x/dt^2=F(x)$, se multiplican ambos miembros por dx, obteniendo $mv\ dv=F dx$, y luego se integra: $\frac{1}{2}mv^2-\int F\ dx=$ $=$const. La cantitdad $\frac{1}{2}mv^2$ se denomina energía cinética, $-\int F\ dx$ se denomina energía potencial, y la suma de las dos se "conserva" (véase la sección 9.2).

En electrodinámica, una integración similar de las ecuaciones de MAXWELL conduce a la constancia de $\frac{1}{8\pi}\int (E^2+H^2)d\tau \pm \frac{1}{4\pi}\int \mathbf{E}\times\mathbf{H}\cdot ds$. La primera de estas expresiones se interpreta luego como energía existente en el volumen, la segunda como flujo de energía a través de la superficie.

tendería que la causalidad se derrumbe en un campo rotacional) aunque no exista una energía potencial.

El espíritu del principio causal, englobado durante largo tiempo en la ciencia natural de todas las edades, se afirmó con renovado vigor en las exigencias de la teoría de la relatividad. Observando que la ciencia tradicional imponía a las leyes de la naturaleza solamente el moderado requisito de la invariancia temporal, EINSTEIN insistió sobre otras restricciones más rígidas, sobre la invariancia con respecto a las transformaciones en las cuales el observador pase de un sistema de referencia a otro: la teoría especial de la relatividad mantiene la invariancia con relación a sistemas *inerciales,* y la teoría general intenta conservarla para todas las transformaciones espaciotemporales. En el sentido más profundo, por lo tanto, la teoría de la relatividad es un complemento natural del principio de causalidad y, de hecho, su realización final.

Este libro no contiene ningún capítulo especial sobre la relatividad. La razón es evidente, pues la relatividad forma parte hoy en día de la física clásica: su epistemología no es diferente de la que hemos estudiado al ocuparnos de varias disciplinas específicas (capítulos VIII a XI), y nos ha parecido preferible reflejar el punto de vista de la relatividad a todo lo largo de nuestro estudio en vez de dedicarle un capítulo especial. La relatividad no es ya un tema oculto en un remoto nicho de la física, sino que penetra y domina todo su campo.

19.8. La causalidad en otras disciplinas

Está claro que no abrigamos el menor deseo de demostrar la existencia o inexistencia de la verdad *universal* de un principio de causación, ni de establecer el determinismo como un esquema *necesariamente* válido; y tampoco estamos dispuestos a decir que no puede existir ciencia que deje de comprender dentro de sí al principio. Pero subsiste el interesante hecho de que en la actualidad todas las ramas de la ciencia que han alcanzado un satisfactorio estado de precisión adoptan la causalidad como principio de su metodología, y, en realidad, la emplean bajo la forma de la invariabilidad temporal de las leyes (forma en la que la hemos presentado nosotros). Esto se pone de manifiesto con cierto detalle en la tabla 19.1, en la que están reunidas todas las características de importancia para la descripción causal en diversas ramas de la física. En la columna (6) se indica el tipo de ley que vincula un estado [columna (3)] en el instante t_1 con el estado análogamente definido en el instante t_2. La presencia de anotaciones en la columna (6) para todos los ejemplos horizontales establece la causalidad.

Como se ha indicado, no puede haber ninguna relación causal inequívoca a menos que los estados vengan especificados como funciones del tiempo y a menos que estén dadas unas leyes por medio de las cuales puedan efectuarse transformaciones de los estados con el tiempo. Los

estados, a su vez, deben referirse a algún sistema cerrado perfectamente definido que sea autosuficiente a efectos de explicación.

Un repaso de los capítulos VIII a XI aclarará la mayoría de los símbolos utilizados en la tabla 19.1 y hará ver muchos aspectos más sutiles de su significado. En la primera fila, p_i y r_i representan los vectores de impulso y de posición del i-ésimo punto material (suponemos finito el número total de puntos materiales). La separación de variables en tres grupos, variables de estado, variables independientes y observables, que se observa en las columnas (3), (4) y (5), es algo artificial y la hemos efectuado para estimular la reflexión acerca de los detalles: *todas* las variables de los tres grupos son, naturalmente, observables, aunque a veces observables latentes; pero, de entre ellas, algunas resultan ser especialmente importantes, al ser portadoras de todo el conjunto de la descripción causal, por lo que se las elige para variables de estado; en cuanto a las variables independientes, forman una especie de telón de fondo de toda la descripción física y no son características de ningún sistema especial; el tiempo figura siempre entre ellas, y para los sistemas *continuos* existen también las coordenadas espaciales.

Las variables de estado de un cuerpo rígido son p y r, el impulso y posición de su centro de gravedad, más tres ángulos (α, β, γ) y sus derivadas con respecto al tiempo. P, V y T significan la presión, el volumen y la temperatura, variables que son apropiadas para un gas. Si se considerase otro tipo de cuerpo termodinámico, tal vez tuviera que ampliarse esta lista.

La termodinámica muestra otras notables características: es la única rama de la física en la que t no es una variable independiente; pues, en sentido estricto, la termodinámica no tiene variables independientes. En ella hay muchos observables de análogo rango y el análisis se lleva a cabo confrontándolos todos unos con otros; la situación observacional es generalmente tal que cualquiera de ellos puede hacerse variar a voluntad mientras todos los demás se mantienen constantes, y, por ello, cualquier observable puede ser tratado como independiente. La columna final muestra un cero para la termodinámica porque las "leyes del movimiento" en la forma que se considera básica (ecuaciones de estado) son ecuaciones primitivas, no existiendo ninguna variable independiente especial con respecto a la cual pudiera uno diferenciar "imparcialmente". Como todo estudioso de la materia sabe, la termodinámica abunda en derivadas, pero éstas no funcionan en la predicción causal tal como hemos utilizado este término.

La mecánica cuántica está incluida en la tabla 19.1. No hay necesidad de tratarla por separado siempre que mantengamos consecuentemente el presente punto de vista: si alguna de las otras disciplinas es causal, entonces, evidentemente, la mecánica cuántica es también una disciplina causal; desde luego, sus observables son a menudo latentes, como ya hemos hecho notar debidamente, pero este hecho, aunque muy importante en un estudio de la predicción, no abroga, ciertamente, su compro-

TABLA 19.1

Rama de la ciencia (1)	Sistema (2)	Variables de estado (3)	Variables independientes (4)	Observables (5)	Tipo de ley (6)	Orden de la ecuación diferencial (7)
Mecánica de partículas	Conjunto de puntos materiales	p_i, r_i	t	Energía, velocidad angular, impulso, etc.	Ecuación diferencial ordinaria	2
Mecánica de cuerpos rígidos	Cuerpo rígido	p, r, α, β, γ, . . . α, β, γ,	t	Energía, velocidad angular, impulso, etc.	Ecuación diferencial ordinaria	2
Mecánica de medios continuos	Continuo elástico	S (tensor de esfuerzos)	x, y, z, t,	Presión, energía, impulso longitudes de onda, etc.	Ecuaciones diferenciales parciales	1 en x, y, z 2 en t
Hidrodinámica	Flúido	V (velocidad)	x, t, z, t	Presión, energía, impulso flujo, intensidad del vórtice, etc.	Ecuaciones diferenciales parciales	1
Electrodinámica	Campo	E, H	x, y, z, t	Energía, impulso densidad de carga, corriente, etc.	Ecuaciones diferenciales parciales	1
Termodinámica	Cuerpo (p. ej., un gas)	P, V, T	Ninguna (en absoluto)	Cantidad de calor, energía libre, entropía, etc.	Ecuaciones ordinarias	0
Mecánica estadística	Agregado probabilístico con distribución de moléculas	Valores medios de los observables	x, y, z, t	Energía, velocidad, impulso, etcétera	Leyes del cálculo de probabilidades unidas a las de la mecánica de puntos	Mezcla
Mecánica cuántica	Entidades del microcosmos	φ (función de estado)	x, y, z, t	Energía velocidad, impulso, etcétera	Ecuación diferencial parcial (de SCHRÖDINGER)	2 en x, y, z 1 en t

miso con el principio de causación. En la sección siguiente tendremos más que decir sobre este extremo.

Más grave es la situación causal de la termodinámica, que no utiliza, en absoluto, la variable temporal en sus empresas: dice, simplemente, lo que sucederá a la larga cuando se efectúen ciertos cambios en sus variables de estado, pero rehusa decir en qué instante acabará todo ello. Esta se halla de perfecto acuerdo con nuestra insistencia en que las leyes deben ser independientes del tiempo, pero se ajusta a la prescripción tan automáticamente que hace trivial el esquema; en la termodinámica, por lo tanto, la descripción causal degenera hasta un nivel de relativa insignificancia; y por esa razón puede quererse o no clasificar esta ciencia entre las causales, aunque sería equivocado decir que viole la causalidad. Como todos los demás principios metafísicos, el causal tiene regiones neutrales donde su aplicación no merece que se haga hincapié en ella.

19.9. La causación en la biología

Observará el lector que todas las ramas incluidas en la tabla 19.1 son partes de la física. El efecto de esta limitación es serio solamente en cuanto concierne a la biología y a las ciencias sociales, ya que la astronomía, la química y todos los tipos de ingeniería se hallan fundamentalmente presentes en nuestra tabulación. Tal vez no sea posible afirmar por el momento que la biología pueda insertarse en una tabla análoga; en todo caso, la tarea es de la incumbencia de los expertos en ese campo. No obstante, nos permitiremos unas cuantas observaciones generales que hagan ver nuestro punto de vista.

Si la biología es un sistema causal o no y si se utiliza una formulación del principio de causalidad diferente de la utilizada por las ciencias físicas son cuestiones a resolver no atendiendo a los *problemas* de esa ciencia, sino mediante un detenido estudio de sus *soluciones*. Hablar de la complejidad de los organismos y de la suma que es mayor que sus partes, para acabar, por lo general, recordando que la biología es un campo para el que resulta inadecuado el análisis causal, no demuestra nada: también los físicos aristotélicos dijeron lo mismo acerca de la naturaleza inorgánica. En realidad, todo campo del interés humano en el que las variables significativas (variables de estado) no hayan sido descubiertas es por esa misma razón complejo e intransitable, y decir que desafía el análisis causal es, simplemente, admitir que hasta el momento no le han penetrado los métodos usuales de la ciencia. Lo que el pesimista causal pretendía que fuese una declaración de hechos es para el biólogo un reto.

Para resolver el problema de la causalidad en la ciencia biológica, como en la física y dondequiera que sea, se debe prestar atención a aquellas fases de la ciencia que han alcanzado el estadio de solución. Pero cuando nos limitamos a considerar los importantes progresos recientes, por ejemplo los que provienen de los trabajos sobre mutaciones y genética general, en los que contamos con respuestas específicas. nos invade la fuerte impresión de que tales trabajos indican una confianza completa en la estructura determinista de la realidad: todas estas realizaciones proceden de la convicción de que las leyes válidas hoy serán también válidas mañana.

Incluso en las ciencias más fundamentales se presentan lagunas causales: las dificultades del problema de los n cuerpos dejan una posible duda respecto a la exacta legalidad del movimiento de la luna; nuestra ignorancia de las fuerzas nucleares encubre precisas leyes nucleares; el químico, si insiste, puede poner de manifiesto el carácter aleatorio de las acciones moleculares mientras no se hayan calculado en detalle las fuerzas entre las moléculas. Siempre es más fácil percibir el caos que el orden; pero el científico razonable hace caso omiso de los huecos secundarios en la acción de las leyes causales e interpola a través de ellos,

como hace cuando traza una curva suave a través de un número finito de puntos.

Es probable que una ciencia con la riqueza de datos que posee la biología muestre una característica que, aun presente en el plano inferior de la física, no se manifiesta allí claramente: es la posibilidad de representar una sucesión empírica dada por varias cadenas causales diferentes, a la que llamaremos *multiplicidad de los esquemas causales.* Uno de sus ejemplos más sencillos se presenta en las diferentes explicaciones ofrecidas para los mismos fenómenos por la termodinámica y por la mecánica estadística: las leyes de la termodinámica representan un sistema causal, al menos en el sentido mínimo en que estamos dispuestos a aceptar el término; este modo causal de explicación procede con su propio conjunto de estados y variables de estado y permanece enteramente dentro de los límites conceptuales que así se le imponen; la mecánica estadística, por su parte, efectúa una reducción causal sobre los mismos hechos, pero a una esfera conceptual distinta: sus sistemas y estados son entidades lógicas distintas de las de la termodinámica, y la referencia última al mismo acervo de experiencia inmediata se logra mediante reglas diferentes de correspondencia, como hemos visto. La confusión se produce solamente cuando las dos se mezclan, como, por ejemplo, cuando las leyes probabilísticas que regulan los agregados de la mecánica estadística se inyectan en la termodinámica como si fuesen proposiciones concernientes a la experiencia termodinámica. Independientemente de esto, no causa ningún daño tal multiplicidad de esquemas causales, que es el reflejo de la circunstancia de que un solo objeto de experiencia, como un cuerpo ordinario, puede ser al mismo tiempo un sistema de la termodinámica y de la mecánica estadística. Una multiplicidad semejante aparece en la posibilidad de elección que tenemos de considerar un objeto dado como un conjunto de puntos materiales, un cuerpo rígido o una distribución de cargas en un campo electromagnético. Y tampoco plantea esto un problema metafísico: constituye un recuerdo de que las facetas de la realidad son numerosas.

En biología la multiplicidad de esquemas causales es, probablemente, lo suficientemente importante para ser objeto de estudio por derecho propio. Puede dar origen a varios niveles de explicación, quizá a una jerarquía entera de explicaciones, cada una de ellas causal y cada una de ellas un estadio diferente de integración organizativa. Puede así encontrarse una teoría susceptible de formularse apoyándose en moléculas y en fuerzas moleculares, otra a base de sistemas termodinámicos, otra en la que las células y la interacción citológica sean los conceptos básicos y quizá una que hable de estímulos y respuestas. Si podemos basar un pronóstico en la física, tal vez diríamos que pasará largo tiempo antes de que se comprendan completamente las conexiones verticales entre estos esquemas.

La interpretación de la causalidad que hemos propuesto en este capítulo, que surge de un análisis del método en las ciencias físicas, no es

natural para el biólogo y raras veces se la ha empleado en estudios biológicos. En una forma vaga discurre a través de todas las investigaciones, pero a menudo se ve desplazada por otras concepciones distintas que colorean el razonamiento biológico: todavía se sostiene en círculos muy amplios la postura de que la causación biológica es diferente de la causación en el mundo inanimado. En un interesante trabajo de R. S. LILLIE [11] puede verse cómo puede llegarse a esa postura; y la forma en que trata el tema tipifica un enfoque que nosotros hemos dejado de lado.

Para él, los elementos esenciales de la causación son la contigüidad temporal y espacial: los fenómenos cambian de manera causal si entre ellos se pueden detectar conexiones espacio-temporales. Siguiendo a H. J. JORDAN en su uso de la expresión "estructura causal", LILLIE afirma que "la interconexión de este tipo penetra a impregna la naturaleza, y cabe describirla como estructura causal". Desde este punto de vista el problema se desarrolla del modo siguiente: "La cuestión biológica es: ¿qué da coherencia a la multiplicidad de sucesos del sistema y confiere unidad a la sucesión organísmica considerada como un todo? Este es el problema de la integración, que debe ser considerado como el problema esencial de la causación biológica."

Al llegar a este punto, el problema de la causalidad ha quedado despegado de su marco histórico y ha perdido todas las características metodológicas que lo hacen digno de estudio: lo que LILLIE llama el problema de la causación biológica es el problema de la biología, y la causalidad se identifica así con la investigación biológica. Probablemente, no es acertado difundir la cuestión hasta ese punto. Mas, para evitar tales generalidades, es necesario refrenar el juicio al principio: la causalidad no debe ser definida como mera contigüidad espacial y temporal, que puede presentarse sin nexo causal; y si se encuentra que un suceso influye en otro, la contigüidad física quedaría así establecida automáticamente (los campos de radiación y la acción a distancia pueden siempre proporcionar las interconexiones que según esta concepción exige la causalidad). Sin embargo, parece que se requiere algo más, y nosotros sostenemos que el requisito adicional es, no la unidad de la sucesión organísmica, sino la invariabilidad de las leyes que rijan tal sucesión.

19.10. LA CAUSALIDAD EN LA FÍSICA CUÁNTICA; LA COMPLEMENTARIEDAD

Aunque en las páginas precedentes hemos revisado a fondo el puesto causal de la mecánica cuántica, los aspectos polémicos de este problema hacen deseable un breve resumen. En la primera década de descubrimientos, que terminó en 1935, ningún sencillo *slogan* excepto el de "violación del razonamiento causal" se estimó suficientemente dramático como para describir las revolucionarias cualidades de los nuevos cono-

[11] R. S. LILLIE: "Biological Causation", *Phil. Sci.*, 7:314 (1940).

cimientos. Entretanto, la nueva ciencia ha tenido tiempo de asentarse y de insertarse en la estructura general de la física. Ya no es una ilusión ver restaurada la causalidad, toda vez que, al reconocerse que las funciones φ son estados que satisfacen una ley (la ecuación temporal de SCHRÖDINGER) en todo similar a las de las más usuales ramas de la ciencia, se ha llegado a una síntesis con concepciones más antiguas.

Los estados φ en evolución causal no se hallan inmediatamente ligados a observaciones aisladas: se refieren, como hemos visto, a agregados de observaciones. La descripción causal se había tornado no causal debido a que los observables, aunque deben ser poseídos por sistemas físicos, se había descubierto que eran latentes y no habían dado valores coherentes en observaciones repetidas. Esto necesitaba una nueva formulación de los estados a base de distribuciones probabilitarias, y había que introducir unas reglas de correspondencia de un tipo hasta entonces inesperado *para restaurar la causalidad;* pero, por lo demás, los estados eran tan buenos como siempre, pues existen muchos campos de la ciencia matemática que operan con construcciones interpretativas totalmente alejadas de la experiencia inmediata. En la mecánica cuántica, pues, la forma básica de descripción ha permanecido inalterada, mientras que las reglas de correspondencia han sufrido cambios radicales.

Es cierto, desde luego, que una sola medición de un observable, llevada a cabo sobre un sistema atómico, no determina en general un estado y no puede, por lo tanto, constituir la base para predicciones causales; y tampoco es posible conocer el resultado de una única medición cuando se disponga de un pleno conocimiento de un estado (función φ), pues un estado no está relacionado con una sola medición. (Pero un estado en t_1 sí entraña unívocamente un estado en el instante t_2.) En un sentido muy fundamental, esto no es más extraño que la circunstancia de que el estado mecánico de un sistema de masas, aun cuando sea completamente conocido, no permita predicción alguna de su color: a estos efectos, posiciones y velocidades serían variables equivocadas. La analogía que acabamos de ofrecer es correcta siempre que no llevemos nuestras expectativas más allá de lo que estas afirmaciones permiten; pues ocurre que es posible para los físicos *aumentar* la descripción mecánica de las masas introduciendo entidades no mecánicas, como cargas reguladas por leyes electrodinámicas, y, de esa manera, acoplando elementos diversos del discurso, explicar finalmente el color, pese a la ceguera de la mecánica con respecto a ese observable. Es ésta una cuestión de suerte, no garantizada por el éxito de la mecánica clásica misma. En la mecánica cuántica, debido a la latencia de los observables atómicos, ninguna combinación de raciocinios, ninguna clase de juegos malabares con "parámetros ocultos" extraerá de los estados el conocimiento de sucesos de observación individuales; pero los estados continúan evolucionando de manera causal.

Los que niegan la causalidad en la física cuántica resucitan la batalla entre KANT y HUME. Si la conexión causal se define como existente

en el plano *P*, de modo que relacione observaciones inmediatas, la causalidad estricta se ha perdido en la física moderna. Pero esta clase de causalidad ha sido repudiada muchas veces antes de la presente era y, de hecho, nació ya muerta; pues, ¿no declaró el propio HUME que la creencia del hombre en ella era injustificada, y no la presentaron como una ilusión todos los empiristas clásicos que interpretaban la causalidad como un nexo de la experiencia inmediata? Como veremos, la mayor hazaña de KANT fue destruir la creencia de que en las leyes de la naturaleza entraban directamente observaciones inmediatas. Y si esto es verdad, la causalidad reina en la física cuántica como lo hizo en la teoría clásica de la naturaleza.

Todo nuestro análisis del método científico, el hincapié que hemos hecho en las construcciones interpretativas y los verifactos, y nuestra concepción de las reglas de correspondencia, nos comprometen a esta última postura. No sostenemos que el razonamiento científico *deba* ser causal para ser inteligible o para ser válido: el continuar adhiriéndose al postulado causal es en la actualidad una postura más radical e impopular que su repulsa; la mantenemos, sin embargo, porque *ninguna teoría deductiva, ni siquiera antes de la mecánica cuántica, definía los estados a base de observaciones inmediatas,* y juzgaríamos mal la historia y la ciencia si achacáramos a la teoría cuántica la desviación inicial consistente en el uso de estados abstractos, no enlazados *inmediatamente* con las observaciones.

Resumiendo: la física clásica definía estados a base de observables poseídos por sistemas, estados que se hallaban causalmente relacionados entre sí; mas, como quiera que los observables poseídos están enlazados directamente con observaciones aisladas, no importaba mucho que las ideas de los científicos estuvieran muy claras (no se causaba daño real alguno si la relación entre estados se transfería inadvertidamente, a través de las reglas de correspondencia, al plano inmediato de la percepción). La física atómica, con sus observables latentes, introdujo reglas estadísticas de correspondencia, y, si bien los estados continúan relacionados causalmente, no puede hacerse aquella transferencia a través de estas reglas, más complicadas.

Las consecuencias prácticas de este cambio están completamente fuera de discusión entre los científicos: la causalidad de HUME se ha desvanecido definitivamente. No puede decirse que acontecimientos aislados de gran magnitud tengan las pintorescas causas formadas por un solo suceso que contemplaba la física clásica: aunque yo conozca el estado exacto de un neutrón (poseedor de una energía claramente definida) capaz de detonar una bomba atómica, y conozca exactamente el emplazamiento del bloque de plutonio que esté listo para hacer explosión, no puedo predecir si ocurrirá el desastre. Es completamente cierto que el destino del mundo, como acontecimiento único, puede esconderse dentro de la incertidumbre atómica; pero habría que añadir que no es una consideración muy práctica, pues no es probable que yo encuentre

un neutrón que posea una energía claramente definida (y, por consiguiente, una posición totalmente desconocida); y si conocemos su energía sólo aproximadamente, lo normal es que puedan predecirse su posición y la posibilidad de que haga impacto en el bloque de plutonio con una certeza suficiente para las mentalidades prácticas.

Una concepción aparentemente muy imparcial con respecto al problema de la causalidad es la adoptada por BOHR, quien ha volcado todo el peso de su autoridad sobre una declaración llamada *principio de complementariedad.* Reproducimos a continuación el resumen hecho por el propio BOHR de su principio [12]:

> Solamente es posible una descripción causal en sentido clásico en casos en los que la acción que entre en juego sea grande comparada con el *cuanto* de acción y en los que, por consiguiente, sea posible una subdivisión de los fenómenos sin alterarlos esencialmente. Si no se cumple esta condición, no podemos prescindir de la interacción entre los instrumentos medidores y el objeto sometido a investigación, y debemos tener especialmente en cuenta que las diversas mediciones requeridas para una descripción mecánica completa solamente pueden ser realizadas con dispositivos experimentales mutuamente excluyentes. Para comprender plenamente esta fundamental limitación del análisis mecánico de los fenómenos atómicos, es preciso además comprender claramente que en una medición física nunca es posible tomar directamente en cuenta la interacción entre el objeto y los instrumentos de medición, pues éstos no pueden quedar incluidos en la investigación mientras estén sirviendo de medios de observación. Así como el concepto de la relatividad general expresa la esencial dependencia en que se encuentran los fenómenos físicos respecto del marco de referencia utilizado para su coordinación, así también la noción de complementariedad sirve para simbolizar la fundamental limitación con que se enfrenta la física atómica, o sea, la limitación de nuestra arraigada idea de los fenómenos como algo existente independientemente de los medios por los que se observen.

La física tiene la facultad de elegir, dice BOHR, entre describir la naturaleza a base de observables clásicos o a base de estados abstractos, tales como funciones φ. La primera elección permite representarse las cosas intuitivamente, pero exige la renuncia a la causalidad: la segunda prohibe la representación intuitiva, pero permite conservar la causalidad; y nunca se pueden reconciliar estas alternativas. Resulta claro que BOHR interpreta la causalidad a la manera de HUME por lo que a la primera elección se refiere y a la manera kantiana cuando habla de la segunda.

[12] N. BOHR: *Nature,* 131:422 (1933). La mejor exposición de las ideas de BOHR (posterior al momento de escribir el texto correspondiente a esta nota) puede encontrarse en *Einstein,* comp. por P. A. Schilpp, The Library of Living Philosophers, 1949.

Ningún defecto puede encontrarse en el contenido fáctico del principio de complementariedad, ni puede negarse que transmite el inquieto espíritu de la física moderna de un modo sumamente útil. Pero como descubrimiento epistemológico básico tiene algunos serios inconvenientes que es preciso poner de relieve: BOHR no pide a la ciencia que haga una elección, pide a la ciencia que se resigne a un eterno dilema, y quiere que el científico aprenda a vivir ensartado en los cuernos de ese dilema, lo cual no es un consejo filosóficamente saludable. Nosotros creemos que la ciencia, en todas sus aplicaciones de la mecánica cuántica que implica la ecuación de SCHRÖDINGER), ha realizado efectivamente su elección, elección que ha sido la segunda alternativa.

O, por contemplar la situación desde el punto de vista opuesto: el principio de BOHR pone a la naturaleza en la estacada y la deja allí; además, en muchos de sus escritos se manifiesta que se alegra de ello y cree que permanecerá siempre donde la ha puesto. Ahora bien, ha habido muchos períodos en la historia de la ciencia en que compitieron para la victoria teorías rivales, pero siempre se ha terminado por llegar a una decisión. El agnosticismo que involucra la aceptación de la complementariedad es una cosa peligrosa, ya que proporciona pseudosoluciones para otras dicotomías: invita a especular que el problema cuerpo-alma, los aspectos orgánico-mecanicistas de la materia viva y el problema del libre albedrío son, simplemente, manifestaciones de la complementariedad, y han recibido ya el máximo grado de dilucidación de que son capaces. Desde luego, el propio BOHR [13] ha prevenido contra tales erróneas aplicaciones, pero la tentación ha sido a veces demasiado fuerte para los físicos.

19.11. CAUSA Y FINALIDAD

De acuerdo con lo expuesto en la sección 19.5, ciertas ecuaciones diferenciales con coeficientes en los que no interviene el tiempo son las marcas o sellos característicos de la causalidad. Pero en la ciencia física hay también leyes que se expresan por ecuaciones integrales, que cabe considerar como los modernos portadores de la causa final aristotélica, ahora llamada finalidad. Para ver lo que sucede, consideremos el principio de HAMILTON:

$$\int_{t_1}^{t_2} L \; dt = \text{mínimo.} \tag{19.3}$$

L es una función de las variables mecánicas de estado, o sea, la velocidad (v) y la posición (x) de una partícula ahora (en el tiempo t_1) localizada en un punto P. Estas variables son a su vez funciones de t, el

[13] N. BOHR: *Phil. Sci.*, 4:289 (1937).

tiempo, y se desea saber *qué* funciones serán; pues cuando v y x están dadas como funciones de t, el camino de la partícula está determinado. La ecuación (19.3) dice que estas variables dependen de t de una manera que hará que la integral temporal de la cantidad L sea lo más pequeña posible mientras la partícula se dirija a partir de t_1 hacia un futuro desconocido; dicho más brevemente, la naturaleza "quiere" conservar su preciosa L, y acomoda el movimiento de la partícula "a la vista de este fin". Este es el contacto más estrecho logrado entre ciencia física y finalidad; y por ello, la cuestión de la teleología en su forma más científica casi se reduce a lo siguiente: ¿hay que describir ciertos aspectos de la naturaleza física a base de principios integrales más que de diferenciales? Creemos que ésta es la forma de la cuestión a la que debe últimamente someterse la "tendencia buscadora de objetivos".

Para obtener una respuesta parcial, observemos lo que hace el físico cuando aplica la ecuación (19.3). Por medio de un truco bien conocido de los matemáticos (hallar las ecuaciones de EULER, que son condiciones necesarias para que la integral tenga un mínimo o un máximo), convierte la relación integral en un grupo de ecuaciones diferenciales llamadas ecuaciones de LAGRANGE, que son de tipo causal. De esta manera —y ello tal vez sorprenda a los metafísicos— *ha transformado una finalidad en una causa.*

Cuando se prescinde de las claras formulaciones analíticas, la finalidad y la causa significan, en realidad, muy poco: ¿cae la piedra al suelo *porque* su posición actual forma parte de una sucesión de posiciones que termina al tomar contacto con el suelo, o *para* hacer que aquella posición forme parte de esa sucesión?; cuando yo busco un objetivo, estoy en cierto sentido logrando una finalidad, pero ¿no es ese objetivo, considerado como motivo psicológico, la causa de mis acciones? DE NOUY [14], al tratar de demostrar la necesidad de finalidades en el proceso de evolución, incurrió en un interesante error: comparó el desarrollo de la vida con el paso gradual de pequeños riachuelos de agua descendiendo ladera abajo por una colina; las fuerzas mecánicas debidas a obstáculos en el curso del agua causan innumerables desviaciones de la línea recta a la corriente; y estas fuerzas incidentales, sostiene DE NOUY, pueden ser explicadas causalmente, pero la tendencia a moverse cuesta abajo es teleológica y está superpuesta a las causas mecánicas. El error es evidente, pues sabemos ahora que le fuerza de gravedad no es menos mecánica ni menos causal que las fuerzas debidas a las piedras interpuestas en el curso del agua, pero el error es instructivo a este respecto: para un científico que comprendiese los efectos debidos a los obstáculos pero, en un determinado estadio de conocimiento, no comprendiese la gravedad, aquéllos aparecerían como causas y ésta como finalidad; mas lo que ahora parece ser una finalidad puede convertirse en causa cuando se haya ensanchado el horizonte de la comprensión.

[14] Lecomte de NOUY: *Human Destiny,* Nueva York, Longmans, Green & Co., Inc., 1947 [vers. cast.: *El destino humano,* Buenos Aires, S. Rueda, 1948].

Es una suerte, por lo tanto, que la ciencia natural proporcione un rígido marco al que pueda ser incorporada la controversia causa-finalidad. ¿Son las obras de la naturaleza de un tipo tal que *requieran* que sus leyes se formulen mediante integrales? Hay, desde luego, formulaciones de tipo integral, lo mismo que la ecuación (19.3), entre ellas [15] el principio de FERMAT o de mínimo tiempo, el principio de GAUSS de mínima ligadura y el de mínima acción o de HAMILTON; pero la cuestión es: ¿es posible transformar éstos y todos los demás principios integrales en ecuaciones diferenciales?

Hoy día parece que, en efecto, es posible transformalos así. Esta idea ha sido defendida por BORN, el cual ha recalcado el espúreo carácter de las finalidades introducidas desde fuera en la naturaleza: todas las teorías de la física moderna que son razonablemente completas y emplean ecuaciones integrales permiten efectuar dicha transformación, y el que se utilice la forma integral o la diferencial es algo que depende frecuentemente de razones de conveniencia. Incluso en la mecánica cuántica se puede echar mano de ambas alternativas; el principio variacional (integral) proporciona muy a menudo una solución más fácil de un problema dado que su equivalente práctico, la ecuación de SCHRÖDINGER.

Con toda imparcialidad, sin embargo, queremos hacer constar que PLANCK, incluso al final de su trágica vida, consideró la validez de los principios integrales como monumentales demostraciones de finalidad en el universo.

Las precedentes observaciones parecerán al estudioso de psicología y ciencias sociales una forma poco seria de desechar el problema de la finalidad. Debe recordarse, sin embargo, que estamos tratando solamente de cuestiones a las que puedan dar respuesta efectiva los actuales métodos de la ciencia natural. Las limitaciones impuestas por nuestro planteamiento pueden ponerse en evidencia enunciando el problema en la forma siguiente: ¿conlleva finalidades la *naturaleza*? Si, desde el principio, se considera la finalidad concomitante de la consciencia, el problema cae dentro del terreno de la psicología introspectiva, donde los métodos de la ciencia natural no han fructificado plenamente todavía.

RESUMEN

Para precisar el significado de la relación causa-efecto es necesario distinguir entre causas parciales y totales. Una causa parcial puede ser una cosa o un suceso, mientras que una causa total es siempre una fase de un proceso. La formulación más definida, que es la que aquí adoptamos, es la que se enuncia a base de los estados definidos en el capítulo VIII.

---

[15] Véase LINDSAY y MARGENAU: *Foundations of Physics*, Nueva York, John Wiley & Sons, Inc., 1936.

La doctrina de la causalidad de LAPLACE es la interpretación epistemológica de la física newtoniana. Al centrar la atención sobre la existencia —en el sentido matemático de esta palabra— de una fórmula del mundo y al dejar de hacer hincapié en la simple capacidad predictiva humana, la teoría de LAPLACE logra la perspectiva correcta; pero no describe nada más que la continuidad de los movimientos. Para convertirla en una enunciación exacta del principio causal ha de imponerse una importante restricción sobre la fórmula del mundo: tiene que ser una ecuación diferencial o un grupo de ecuaciones diferenciales que no contengan explícitamente la variable temporal. Puede demostrarse que esta restricción complementaria tiene como importante consecuencia la validez de las leyes de conservación (de energía, momento, etc.); y existe, además, una estrecha afinidad entre el principio causal así modificado y los postulados de la teoría de la relatividad.

Un breve examen de las ciencias no físicas, particularmente de la biología, revela un universal interés por la causalidad en esta forma revisada. Con objeto de señalar hasta qué punto penetra el análisis causal en varias partes de la física, hemos presentado una tabla (pág. 372) en la que pueden verse en detalle los caracteres causales que son significativos desde el presente punto de vista. Entre otras cosas, este estudio sugiere que la termodinámica es la menos causal de las ramas de la ciencia física.

Hemos planteado de nuevo la cuestión referente a la función de causa y efecto en la mecánica cuántica, y hemos demostrado que esta disciplina no se separa de la metodología de las teorías anteriores si los estados se interpretan de la manera explicada en los capítulos XVI a XVIII. Pasamos revista al principio de complementariedad de BOHR y hacemos ver que es una solución correcta del problema general, pero que rehuye comprometerse.

Hacemos, finalmente, un intento de apreciar el significado de la finalidad en cuanto distinta de la causa; advertimos que es frecuente que inyectemos aquélla en situaciones que no están plenamente analizadas y que cabe transformar a menudo las finalidades en causas cuando están al alcance de la mano las soluciones completas. Pero no es posible decir, en el actual estado de la ciencia, que tales transformaciones sean siempre posibles.

BIBLIOGRAFIA

BERGMANN, H.: *Der Kampf um das Kausalgesetz in der jüngsten Physik*, Braunschweig, Vierveg und Sohn, 1929.

BOHR, N.: "Kausalität und Komplementarität", *Erkenntnis*, 14:293 (1937).

CASSIRER, E.: *Determinismus und Indeterminismus in der modernen Physik*, Göteborg, Elanders Boktryckerie Aktiebolag, 1937.

FRANK, P.: *Das Kausalgesetz und seine Grenzen*, Viena, Springer-Verlag, 1932.

JORDAN, P.: *Die Herkunft der Sterne*, Stuttgart, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, 1947.

LENZEN, V. F.: *Physical Causality ("Univ. Calif. Pub. Philosophy, 15")*, Berkeley, 1942.
LILLIE, R. S.: "Biological Causation", *Phil. Sci.*, 7:314 (1940).
MARGENAU, H.: "Causality and Modern Physics", *The Monist*, 41:1 (1931).
MILNE, E. A.: *Kinematic Relativity*, Nueva York, Oxford University Press, 1949.
ROSENFELD, L.: "L'Evolution de l'idée de causalité", *Mem. Soc. Roy, Sci. Liège*, 4.ª serie, vol. 6 (1942).
WINN, R. B.: "The Nature of Causation", *Phil. Sci.*, 7:192 (1940).

CAPITULO XX

EL PRINCIPIO DE EXCLUSION

20.1. Su origen y función

El principio de exclusión desempeña un importante papel en la mecánica cuántica y tiene efectos que son casi tan profundos y de tanto alcance como los del principio de relatividad en la física clásica. En realidad, existen sorprendentes semejanzas entre los dos, tanto con respecto al plano metodológico en que operan como con respecto a la restrictiva cualidad que muestran—pues ambos principios imponen vetos a un nivel muy básico de la descripción física [1].

La *relatividad* exige que las leyes de la naturaleza que no se conformen a su requisito de invariancia dejen de tenerse en cuenta; el *principio de exclusión* dice que los estados (en el sentido cuántico) que no llegan a tener ciertas propiedades matemáticas no se realizan en la naturaleza. No hace falta insistir en que se ha conseguido verificar ambos principios valiéndose de métodos muy perfeccionados y meticulosos, de modo que el sabor legalista del anterior enunciado no es muy afortunado; es, sin embargo, un hecho que la relatividad y la exclusión guían la investigación como vetos sobre los procedimientos, y no como máximas descriptivas derivadas de la experiencia.

Como desempeñan este papel, casi se siente la tentación de incluir estos principios entre los requisitos metafísicos del capítulo V. Ciertamente, son más básicos y más generales en sus aplicaciones que las leyes especiales de la Naturaleza, que ellos obligan a conformarse a sus demandas; mas, por otra parte, éstas son algo más específicas que las de fertilidad lógica, extensibilidad, causalidad, etc., y el descubrimiento de ambos principios es tan reciente que quizá no ha habido lugar para su completa amalgama con los principios más tradicionales de la ciencia; y debe decirse también que, en la actualidad, la exclusión presenta señales de no haber sido comprendida del todo y suscita esperanzas de descubrimientos futuros aún más grandes, descubrimientos de los que este principio no sería más que un temprano heraldo. A la vista de estos hechos, tratamos estos dos notables vetos como principios de

---

[1] Un tercer principio de este tipo, todavía no desarrollado por completo, es el postulado de reciprocidad de Bohr. Para su exposición, véase M. Bohr: *Nature*, 163:206 (1949).

la física en vez de incluirlos entre los requisitos metafísicos de todas las ciencias exactas; tal vez llegue el día, sin embargo, en que, posiblemente tras alguna metamorfosis, lleguen a ascender a esto último.

La importancia fundamental de la relatividad ha sido reconocida por los filósofos desde el principio: descubierta en un momento en que apenas si sucedía otra cosa, la nueva teoría de EINSTEIN fascinó al mundo científico, y, en particular, se adueñó de la imaginación de los matemáticos; resolvió en el acto problemas sumamente conocidos y provenientes de muy antiguo (problemas que, por su misma persistencia, habían adquirido un cuño de gran importancia en las mentes de todos los físicos) con una solución audaz, algunas de cuyas consecuencias resultaban inquietantes para el no científico. Y sucedió que la imaginación filosófica se excitó: la relatividad fue objeto de estudio en sus aspectos metodológicos y se produjo un fructífera interacción entre la física y la filosofía.

El principio de exclusión fue descubierto por PAULI en 1925; iluminó en seguida un enorme campo de hechos físicos y los físicos lo aceptaron con general aclamación. Pero nació entre un torrente de descubrimientos fácticos, en un momento en que toda la nueva estructura de la teoría de los *cuantos* adquiría existencia y, por consiguiente, muchos lo consideraron simplemente como otro interesante teorema comprendido dentro del formalismo de la nueva disciplina; su éxito en cuanto a resolver problemas fue mayor aún que el logrado por la relatividad, pero los problemas que resolvió eran muy técnicos y, por tanto, de interés para pocas personas (como son los problemas concernientes a los detalles de la estructura atómica). o tan viejos que la gente se había acostumbrado a ellos, como, por ejemplo, el problema de la valencia química. Como resultado de todo esto, el principio quedó incorporado dentro de la axiomática de la mecánica cuántica, y su peculiar significación metodológica. pasó inadvertida.

20.2. ENUNCIADO DEL PRINCIPIO DE EXCLUSIÓN

Hay varias formas de enunciar el principio. Una de ellas disfruta de especial favor en los estudios más elementales de la teoría de los *cuantos,* porque está envuelta en modelos y permite una pronta visualización; la vamos a llamar la *formulación simple.* Desgraciadamente, la importancia filosófica del principio no se manifiesta con toda claridad en su forma simple, que lo hace parecer una proposición incidental referente a ciertas partículas elementales de la física; para reconocerlo como norma reguladora de gran generalidad, es preciso enunciar de otra forma, ésta matemática, el significado de la exclusión. Consagraremos la sección siguiente a esta formulación *matemática,* que, a efectos de hacerla más completa y por razones pedagógicas, haremos preceder por el enunciado simple. PAULI descubrió este principio al analizar el movimiento de los

electrones; y, aunque es también aplicable a otras entidades (como demostraremos más adelante), lo consideraremos por el momento sólo en relación con el problema de la estructura atómica. Para comenzar, recordemos un antiguo aforismo, presuntamente científico, que dice que dos cuerpos, o partículas, no pueden ocupar el mismo lugar al mismo tiempo. Cabe considerar este axioma de la impenetrabilidad, con los debidos refinamientos, como el precursor del principio de exclusión, que dice que *dos electrones no pueden hallarse en el mismo estado de movimiento.* Mas es menester una considerable labor interpretativa para que esta frase adquiera sentido; pues ¿qué es un estado de movimiento?

En la física clásica se define el estado de movimiento de una partícula como el agregado de sus coordenadas y de las componentes de su velocidad. Teniendo esto en cuenta, el principio excluye la posibilidad de que dos partículas tengan la misma posición en el espacio y se muevan con la misma velocidad, y equivale, por tanto, a una limitación más trivial aún que el axioma de impenetrabilidad. Pero el significado de *estado* no debe tomarse en el sentido clásico.

La formulación simple hace referencia a la teoría de los electrones de BOHR o al resto de ella que se mantiene vivo en la física moderna como concesión a nuestro hábito de representación gráfica. Según esta teoría, los electrones se mueven normalmente en órbitas alrededor de los núcleos, y cada órbita está caracterizada por unos números cuánticos. Al principio estos números eran tres: uno (n), era una medida de la distancia del electrón al núcleo; otro (l), una medida de su momento angular, y el tercero (m), un número que servía para fijar la orientación de una órbita electrónica en el espacio. PAULI observó que más de *dos* electrones no podían tener nunca el mismo conjunto de números cuánticos, n, l y m. Así, el electrón de un átomo (no excitado) de hidrógeno tiene el conjunto (1, 0, 0); los dos electrones del helio ostentan este mismo conjunto, pero el tercer electrón que posee el litio no es capaz de asumir estos valores: la "capa K" de electrones está llena, y el electrón sobrante del litio tiene que buscar otro conjunto de números cuánticos llamado "capa L". Este proceso continúa a todo lo largo de la tabla periódica.

Una desconcertante característica de este sorprendente esquema es la preferencia de la naturaleza por los pares. Puesto que atribuir sexo a los electrones no es un procedimiento plausible, empieza uno a sospechar la existencia de un defecto en el análisis presentado: por ejemplo, si la descripción de un estado a base de tres números cuánticos fuese incompleta, y se necesitara un conjunto mayor, los dos miembros de un par podrían diferir con respecto a un número cuántico que hubiese quedado fuera de esta descripción. Tal era, en efecto, la explicación de los pares; pues se descubrió que, además de moverse en una órbita, cada electrón giraba alrededor de su propio eje, y este movimiento giratorio podía producirse de una de dos maneras. Por consiguiente, hubo que introducir un número cuántico adicional, s, con valores -1 y $+1$,

y el principio de exclusión adoptó así una forma más plausible: *dos electrones no pueden tener los mismos cuatro números cuánticos n, l, m* y *s.* De este modo, la aparición de pares con respecto a los tres primeros números cuánticos se ha convertido en legítima.

La forma simple del principio es muy fructífera. Conduce en seguida a una comprensión de la estructura cortical de los átomos, y los importantes hechos de la valencia química, la espectroscopia y el magnetismo. Pero no se puede ocultar su debilidad lógica.

Hay algo insatisfactorio en un pronunciamiento fáctico de tipo descriptivo a un nivel metodológico tan profundo: a uno le gustaría saber por qué los electrones se comportan de ese modo. El principio, enunciado en esta forma, alude a una peculiar y casi irracional propensión de la naturaleza, muy semejante a su primitivo horror al vacío. Es, por consiguiente, deseable una ulterior penetración analítica, cosa que ha sido realizada principalmente por HEISENBERG.

En este estadio del conocimiento se pueden formular embarazosas preguntas, y, como a menudo desconciertan a los estudiantes de física, vamos a plantearlas y responderlas brevemente. ¿Por qué sólo los electrones *del mismo átomo* se ven afectados por el principio de exclusión? Dos átomos de helio contienen cuatro electrones, dos de los cuales tienen idénticos conjuntos de números cuánticos *n, l, m* y *s.* ¿De dónde procede la obediencia a los dictados de la exclusión: de alguna influencia procedente del núcleo más próximo?; mas, si es así, ¿cómo sabe un electrón a qué núcleo ha de obedecer cuando los átomos se hallen muy próximos entre sí?

El principio de exclusión no limita su validez a los electrones de un solo átomo; trata igualmente a todos los electrones de todos los átomos. El error de interpretación que sale a luz en las anteriores preguntas proviene del excesivo hincapié que hemos hecho en el usual conjunto de números cuánticos que acabamos de explicar; pues estos números sólo son aceptables cuando se trate de un electrón que se mueva alrededor de un núcleo: si un electrón está en el campo de fuerza de dos núcleos de helio, se requiere un nuevo grupo de números cuánticos característicos del problema de dos centros, y con respecto a ese grupo los cuatro electrones de los dos núcleos de helio *tienen* diferentes números cuánticos. Vemos, por tanto, que el principio no discrimina en cuanto a átomos individuales y no proviene de una relación de propiedad entre un centro de fuerzas y los electrones que se mueven en torno a él.

Resulta curioso que la exclusión regule el comportamiento de todas las partículas elementales conocidas, excepto los fotones. Nadie comprende plenamente esta extraña excepción. Sistemas compuestos, tales como los deuterones, las partículas alfa, los átomos y las moléculas, pueden o no obedecer el principio, pero siempre es posible deducir de su composición el comportamiento exacto (véase la sección 20.4).

20.3. Formulación matemática

En la mecánica cuántica, el estado de un electrón se representa por una función $\varphi(x, y, z)$ (véase el capítulo XVII), cuyo cuadrado es la probabilidad de encontrar a tal electrón en el punto x, y, z del espacio ordinario. Al referirnos a dos electrones debemos ampliar este método de descripción, y la manera de hacerlo es harto obvia: en lugar de las tres coordenadas de un único electrón, que ahora se llamarán x_1, y_1, z_1, hay que utilizar seis, las referentes al electrón 1 y las referentes al electrón 2 (y podemos representar estas últimas con x_2, y_2, z_2). Por ello, el estado de dos partículas es una función de las coordenadas de un espacio de "configuración" hexadimensional, perfectamente conocido para la dinámica clásica de los sistemas de dos partículas: $\varphi = \varphi(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2)$ Como antes, $\varphi^2(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2)$ representa la probabilidad de encontrar el electrón 1 en $x_1y_1z_1$, y el electrón 2 en $x_2y_2z_2$.

Llamemos P_1 al punto $x_1y_1z_1$, y P_2 al punto $x_2y_2z_2$. Se puede entonces escribir, en lugar de $\varphi(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2)$, simplemente, $\varphi(P_1, P_2)$ o, como nueva abreviación, $\varphi(1, 2)$. Ahora bien, es importante hacer notar que $\varphi(1, 2)$ no es en general igual a $\varphi(2, 1)$. Un ejemplo aclarará esto. En el caso más sencillo, en que ambas partículas están confinadas a moverse en una línea, solamente se necesitan como coordenadas x_1 y x_2, y una posible función de estado sería $\varphi(1, 2) = \operatorname{sen} x_1 \cos x_2$. Pero $\varphi(2, 1)$ es entonces igual a sen x_2 cos x_1 que no es igual a sen x_1 cos x_2, como se ve por la circunstancia de que para los puntos $x_1 = \pi/2$, $x_2 = 0$, $\varphi(1, 2) = 1$, mientras que $\varphi(2, 1) = 0$.

La clase entera de las funciones $\varphi(1, 2)$ puede, evidentemente, dividirse en tres subclases, definidas por los siguientes criterios:

$$\begin{aligned} &\text{S: } \varphi(2, 1) = \varphi(1, 2) \\ &\text{A: } \varphi(2, 1) = -\varphi(1, 2) \\ &\text{M: } \varphi(2, 1) \text{ no es ni } \varphi(1, 2) \text{ ni } -\varphi(1, 2). \end{aligned}$$

Las funciones que satisfacen el criterio *S* reciben el nombre de funciones simétricas; las que satisfacen *A*, antisimétricas, y de las restantes se dice que son mixtas (esta última subclase contiene con mucho el mayor número de casos). Ejemplos de las tres clases son:

$$\begin{aligned} &x_1 + x_2 \qquad \text{(S)} \\ &x_1 - x_2 \qquad \text{(A)} \\ &2x_1 + 3x_2 \qquad \text{(M)}. \end{aligned}$$

El principio de exclusión de Pauli en su formulación matemática exige que *todas las funciones que representen estados de dos electrones sean de la variedad antisimétrica.*

Vamos a demostrar ahora que este enunciado, un tanto abstracto, es, en realidad, equivalente a la forma más simple. Supongamos que la partícula 1, si se presenta sola, esté representada por la función de es-

tado $u(x_1, y_1, z_1)$, o, abreviadamente, $u(1)$; su probabilidad de estar en P_1 será entonces $u^2(1)$. Análogamente, hagamos que la partícula 2, cuando se presente sola, se halle en el estado $v(2)$, con probabilidad $v^2(2)$ de encontrarla en P_2. De acuerdo con una de las conocidas reglas del cálculo de probabilidades, la probabilidad de dos sucesos independientes es igual al *producto* de las probabilidades de los sucesos individuales; y al aplicar esta regla a nuestra situación hallamos que la probabilidad de encontrar la partícula 1 en P_1 y simultáneamente la partícula 2 en P_2 es $u^2(1) \cdot v^2(2)$; lo cual nos obliga a elegir como función de estado del sistema de dos partículas

$$\varphi(1, 2) = u(1) \cdot v(2) \tag{20.1}$$

un simple producto de los estados individuales. Hemos descubierto así un resultado bastante general, que también cabe demostrar de otras varias maneras: la función de estado de cierto número de partículas independientes (o sea, que no estén en interacción) es el producto de las correspondientes a los estados de las partículas individuales.

Pero la función $\varphi(1, 2) = u(1) \cdot v(2)$ no satisface en general el principio de exclusión. Para que lo satisfaga es preciso someterla a un proceso matemático, llamado "antisimetrización" por los osados expoliadores de nuestro idioma; semejante proceso consiste en sustraer de $u(1) \cdot v(2)$ el mismo producto pero con sus argumentos intercambiados o, dicho brevemente, con un "intercambio de partículas"; es decir, la forma antisimetrizada de $u(1) \cdot v(2)$ es

$$\varphi(1, 2) = u(1) \cdot v(2) - u(2) \cdot v(1). \tag{20.2}$$

Esta función pertenece, evidentemente, a la clase A. Puede demostrarse también que no hay ninguna otra manera de hacer antisimétrica $u(1) \cdot v(2)$; el principio de exclusión exige así para los pares de electrones independientes una función de la forma (20.2), no de la forma (20.1), que es la sugerida por razonamientos sólo probabilitarios. La función (20.2), sin embargo, se anula si n y v son iguales[2]; en otras palabras, la probabilidad de todo estado compuesto formado con estados individuales iguales es cero. Esto es precisamente lo que afirma la forma simple del principio.

Si el número de partículas es mayor de dos, la construcción de estados antisimétricos se hace un poco más difícil, pero la teoría no sufre, por lo demás, alteración alguna: otra vez sucede que la función antisimétrica se anula cuando dos *cualesquiera* de los estados individuales de que esté compuesta sean iguales, pero el caso general no produce nada nuevo, por lo que nos abstendremos de ulteriores consideraciones a su respecto.

---

[2] Expresándolo con los términos de la antigua teoría, igualdad de u y v significa igualdad de números cuánticos.

20.4. Consecuencias del principio de exclusión; las cuasifuerzas

La exclusión de estados individuales idénticos es sólo una de las consecuencias del principio; la elección formal de funciones antisimétricas da origen a otros efectos, de trascendental importancia y casi imprevistos. Destaca entre las sorpresas una nueva clase de fuerzas, de origen no dinámico, una cuasifuerza que cabe hacer remontar directamente a las propiedades matemáticas de las funciones que tengan la forma (20.2).

Hemos visto por qué, sobre la base de un simple razonamiento probabilitario, una función dada por la ecuación (20.1) representa un estado en el que las dos partículas no ejercen interacción entre sí. Se trata de un resultado perfectamente general: el estado de varios sistemas físicos no interactuantes es siempre un único producto de los estados de los sistemas individuales; y, a la inversa, si un estado no reviste la forma de producto, tiene que representar individuos interactuantes, o sea —dicho en un lenguaje más técnico—, implica una correlación [3] entre los sistemas. Ahora bien, como hemos visto, el principio de exclusión exige una función que tenga la forma de la ecuación (20.2), que es la diferencia de *dos* productos e implica, por consiguiente, correlaciones.

Una correlación entre partículas, sin embargo, cuando se la interpreta en la mecánica ortodoxa, no puede significar sino la existencia de fuerzas entre ellas. Las funciones antisimétricas exigidas por el principio de exclusión sugieren, por tanto, la acción de fuerzas; y, sin embargo, estas fuerzas no son de origen dinámico, como hará ver el ejemplo siguiente.

Una partícula aislada, no sometida a fuerzas y que se mueva a lo largo del eje x con velocidad proporcional a V_1, tiene una función de estado $u=e^{iV_1x}$ (cf. la ecuación 17.8). Una segunda partícula de la misma clase, si se presentase sola, tendría un estado representado por e^{iV_2x}, supuesto que su velocidad sea proporcional a V_2. Cuando ambas estén presentes, $\varphi(1, 2)$ no será el simple producto $e^{iV_1x_1} \cdot e^{iV_2x_2}$, sino la función antisimétrica

$$\varphi(1, 2)=e^{i(V_1x_1+V_2x_2)} - e^{i(V_1x_2+V_2x_1)}$$

La probabilidad se forma tomando el cuadrado del valor absoluto de φ:

$$w(1, 2)=\text{C}^{\text{te.}}\,[1-\cos(V_1-V_2)(x_1-x_2)]. \qquad (20.3)$$

Hemos obtenido así un resultado sumamente sorprendente, a saber, que

[3] Lo que queremos decir es lo siguiente: la elección de $u(1) \cdot v(2)$ como función de estado corresponde a una probabilidad que tiene también la forma de producto: $w=p(1) \cdot q(2)$. Consideremos ahora las dos probabilidades siguientes: 1) la de encontrar la partícula 1 en a; 2) la de encontrar la partícula 1 en b. Si el *cociente* de estas dos probabilidades, C, es independiente de la posición de la partícula 2, se dice que las partículas *no* guardan correlación alguna. En nuestro caso, $C=p(a)q(2)/p(b)q(2)$, y la función $q(2)$ se cancela; pero subsistiría la dependencia de la posición de la partícula 2 si la función w no tuviese la forma de producto.

es imposible que las dos partículas lleguen a juntarse y, del mismo modo, que no pueden poseer la misma velocidad. Pues si $x_1 = x_2$, $w(1, 2)$ se convierte en cero aunque las velocidades sean distintas, y lo mismo ocurre cuando $V_1 = V_2$, aunque las partículas tengan posiciones distintas: no pueden estar en el mismo lugar ni moverse con la misma velocidad, ya que la probabilidad para estas condiciones se anula. Se ve que las partículas, aunque inicialmente las habíamos supuesto libres, se evitan una a otra, son lo más diferentes posible, tanto en lo que se refiere a posición como en lo que atañe a la velocidad; o sea —por expresar la conclusión en un lenguaje más idóneo, pero equivalente—, la probabilidad de encontrar[4] las partículas en lugares distintos y con velocidades distintas es mucho mayor que la probabilidad de encontrarlas en condiciones similares de movimiento: el efecto físico es un efecto de repulsión, que recuerda el viejo principio de impenetrabilidad.

Pero, extrañamente, la tendencia a evitarse mutuamente depende de la velocidad relativa de las dos partículas. Cuando se representa gráficamente la ecuación (20.3) en función de la diferencia $x_1 - x_2$ para un valor constante dado de $V_1 - V_2$, se ve que el punto $x_1 - x_2 = 0$ es un mínimo, elevándose la curva a ambos lados de *él*. Cuanto mayor sea el valor de $V_1 - V_2$, más empinada será la elevación a cada lado y, por consiguiente, más pequeño el ámbito en el que las partículas se esquiven una a otra. Inversamente, si $V_1 = V_2$, el ámbito de exclusión espacial es infinito. Utilizando una elemental forma de expresión, cada partícula quiere estar sola; cada una huye cuando "huele" a la otra, y su sentido del olfato es más agudo cuanto más se aproxime su velocidad a la de la otra. En cierto modo, esta analogía con un comportamiento sentiente parece más apropiada para la descripción de las correlaciones aquí encontradas que una referencia a fuerzas ordinarias, siendo la principal razón el carácter sumamente insólito de las fuerzas y, especialmente, la dependencia de la velocidad que sería necesaria para ello. Debe, no obstante, formularse la siguiente pregunta: ¿es posible explicar el principio de exclusión o sustituirlo, mediante la admisión de fuerzas especiales, quizá fuerzas de tipo no corriente?

Debe observarse, ante todo, que el uso de funciones antisimétricas no excluye la presencia de fuerzas en el sentido ordinario: si las partículas consideradas en el ejemplo anterior fuesen electrones que se repelieran dinámicamente uno a otro en virtud de sus cargas, cabría incorporar este efecto a las funciones de estado; y la presencia de fuerzas ordinarias se mostraría entonces por encima y más allá del evitarse correlacional que acabamos de ver. Pero un estudio de estas cuestiones nos llevaría muy lejos; de hecho, habíamos supuesto dinámicamente libres las partículas de que nos ocupábamos, según nos aseguran las funciones e^{iVx} que elegimos para representar sus estados.

---

[4] Véase la nota 11 del capítulo XVII.

Una reflexión ulterior sobre la cuestión de la equivalencia entre nuestro principio y la acción de ciertas fuerzas hace salir a la luz otra curiosa situación, que tal vez explicaremos mejor en relación con un ejemplo físico. (Los cálculos en que se apoya la explicación que vamos a dar son muy sencillos, pero no los incluiremos aquí.) Consideremos dos partículas en los extremos de un resorte de acero e imaginemos que el resorte esté vibrando. Las energías cuánticas de este sistema, computadas de la manera ordinaria y sin imponer el principio de exclusión, son $(n+{}^1/_2)\epsilon$, siendo ϵ una constante y n cualquier número entero o cero; la exclusión, sin embargo, obliga a n a ser un entero *impar,* con lo cual, el estado de mínima energía, que sería ${}^1/_2\epsilon$ si el principio no fuese válido, se eleva a ${}^3/_2\epsilon$. Hasta aquí no hay nada que nos impida decir que es un verdadero efecto dinámico, resultante de un error en nuestra apreciación de las fuerzas debidas al resorte; pero el precio que pagamos al hacerlo es éste: tenemos que suponer un resorte ficticio distinto para cada valor de n, ya que el resorte cambia de propiedades físicas de un estado de energía a otro. El físico ha decidido que éste es un precio demasiado elevado, y el filósofo estará de acuerdo con él, sin duda. De nuevo, el decoro metafísico solventa una cuestión, y la decisión tomada se muestra a favor de correlaciones que *no* sean reducibles a fuerzas del tipo tradicional acostumbrado.

En física se las llama fuerzas, sin embargo, aunque su naturaleza no se interpreta erróneamente en manera alguna: todo el que se halla familiarizado con la teoría de los *cuantos* sabe que las *fuerzas de canje* o *intercambio* (éste es el nombre de los efectos de correlación) no deben ser confundidas con las fuerzas ordinarias y son muy difíciles de explicar a los no iniciados; son de extraordinaria importancia y aparecen universalmente, proporcionando explicaciones para todos los fenómenos que surgen de la cohabitación de partículas físicas. La combinación química, la cohesión de los sólidos, las propiedades de los cristales, el magnetismo y muchos otros efectos llamados "cooperativos" no pueden ser comprendidos sin ellas.

Existe un interesante y profundo paralelismo entre el postulado de relatividad general y el principio de exclusión, que se extiende incluso a sus respectivas consecuencias: la relatividad general crea fuerzas físicamente perceptibles a partir de la métrica del espacio, y dotando a sus ecuaciones de la propiedad formal de la invariancia puede explicar la gravitación sin hacer referencia ninguna al concepto de fuerza; el principio de exclusión impone otra propiedad formal, la antisimetría, a las funciones de estado de la física cuántica, y da lugar de este modo a correlaciones que son equivalentes a fuerzas.

En lo que se refiere a la relatividad, el reconocimiento de la notable aparición de fuerzas no dinámicas ha sido general, y se ha dicho que la relegación de las fuerzas a la geometría es el mayor logro de la teoría de la relatividad. Pero ningún juicio semejante ha acompañado al descubrimiento del principio de exclusión, que, de hecho, ha tenido más éxito

que la relatividad en la extracción de fuerzas físicas a partir de simetrías matemáticas. Hay aquí toda una gama de problemas que abundan en estímulos para la reflexión filosófica.

20.5. Generalizaciones y limitaciones

Hasta ahora, nuestro estudio ha tenido buen cuidado de indicar que el requisito de antisimetría se mantiene solamente para los estados de los electrones. La restricción a una sola clase de partículas contrasta fuertemente con las exigencias del capítulo V, y podría esperarse que su aplicabilidad fuese más general. Tal esperanza queda satisfecha, pero no en medida ilimitada; pues resulta que el principio de exclusión se mantiene para la mayoría de las partículas elementales, pero no para todas ellas: la excepción más conocida es el fotón.

Prescindimos por el momento de esta excepción y consideramos las partículas (electrones, positrones, neutrinos, protones, neutrones, mesones) que están sometidas al principio de exclusión, y tomamos nota de la importante matización de que el principio se aplica solamente a partículas de la *misma clase:* así, los estados de dos protones son antisimétricos, pero los estados de un sistema de un solo protón y un solo neutrón no. Las pruebas en favor de esta proposición son completas e incuestionables, pues el sistema compuesto por un protón y un neutrón forma uno de los núcleos más sencillos (el deuterón), que ha sido sometido a un estudio exhaustivo; y unos conocimientos análogos proceden del campo de la espectroscopia molecular, donde se encuentra que las moléculas homonucleares (por ejemplo, N_2) obedecen a reglas de simetría, mientras que las moléculas heteronucleares (por ejemplo, HCl) no.

Es afortunado (en realidad, necesario por razones de coherencia) que el principio pierda eficacia sobre partículas disímiles; pues, como se verá en la sección siguiente, la antisimetría confiere algo afín a la indistinguibilidad a las partículas cuyos estados empareja, y partículas *diferentes* son, naturalmente, distinguibles. Pero existe otra consecuencia a extraer de las precedentes premisas, consecuencia que limita el principio en otro sentido.

Imagínese que la partícula 1, cuyas coordenadas intervienen en la ecuación (20.2), no es un solo electrón, sino que está compuesta por dos electrones o, en general, por dos partículas que estén sometidas a la exclusión de Pauli; y supongamos que la partícula 2 de la ecuación (20.2) tenga la misma composición oculta. Es fácil entonces advertir que la función antisimétrica de la ecuación (20.2) no es un estado correcto para el sistema de cuatro partículas; pues si se intercambian los miembros del par 1, la función debería cambiar de signo, pero no lo hace (y, en realidad, no podría, porque los miembros del par no se han especificado separadamente). Por otra parte, si el par 1 se intercambia con el par 2, la función (20.2) cambia de signo; pero en este caso no debe ocu-

rrir así, porque un intercambio de pares es equivalente a un doble intercambio de miembros individuales, por lo que la función antisimétrica correcta debe cambiar de signo dos veces y, por consiguiente, volver a su condición inicial. La conclusión a extraer es la siguiente: si la partícula cuyas coordenadas aparecen en la función de estado y con respecto a la cual se determina la simetría o antisimetría se compone de dos partículas elementales que satisfacen el principio de exclusión, la función debe ser *simétrica.* Mediante una sencilla generalización, la misma observación se aplica a partículas compuestas de cualquier número de partículas elementales; de esta forma, el principio de antisimetría se convierte automáticamente en uno de simetría bajo condiciones claramente definidas. La física atómica y nuclear proporciona pruebas abundantes de la alternancia de simetrías, que se manifiesta con la máxima claridad en el comportamiento estadístico de distintas sustancias (se cree que la superfluidez del helio a bajas temperaturas es un ejemplo de ello).

Se sabe empíricamente que el fotón existe solamente en estados simétricos; por ello se suscita en seguida la idea de que quizá tenga una composición oculta. Se han formulado toda clase de conjeturas adscribiéndole dos "subfotones" o dos neutrinos, pero todas han fracasado al incurrir en contradicciones con teorías establecidas o con hechos empíricos. En la actualidad, no se entiende del todo el excepcional papel desempeñado por los fotones.

Mas es posible plantear un interesante paralelo entre la anómala simetría de los estados del fotón y otro anómalo comportamiento, paralelo que es probable apunte algún día a una conexión más satisfactoria. Todas las partículas con estados antisimétricos tienen momentos angulares de magnitud $(n+{}^1/_2)h/2\pi$, siendo n cero o un número entero; sólo el fotón (y, posiblemente, algunas clases de mesones) tienen *cuantos* de momento angular que son múltiplos enteros de $h/2\pi$. Existe, evidentemente, un profundo significado oculto en la doble fechoría del fotón; y descubrirlo es uno de los desafíos con que se enfrenta la física atómica.

En el capítulo XVII habíamos prestado atención a la manera en que los estados cambian con el tiempo. Es la ecuación (17.6) la que propaga estados, convirtiendo una función φ_1 correspondiente a un instante dado en φ_2 para algún instante posterior. Ahora bien, está perfectamente el exigir que el estado φ_1 sea antisimétrico, mas ¿seguirá siéndolo a medida que pase el tiempo? El principio de exclusión carece de jurisdicción sobre los cambios temporales, que están regulados solamente por la ecuación de SCHRÖDINGER, y, por consiguiente, será vano en caso de incompatibilidad con esta ecuación. Afortunadamente, puede demostrarse que la ecuación de SCHRÖDINGER nunca puede "mezclar simetrías": los estados que sean originariamente antisimétricos tendrán siempre esa propiedad. La coherencia queda salvada.

La permanencia de la simetría limita la relación causal entre estados de una forma definida (si bien poco importante), ya que impide que se formen estados que tengan una sola clase de simetría a partir de los

que tengan otra. Puede, por lo tanto, decirse que el principio limita el libre nexo causal entre todos los estados imaginables, o incluso que canaliza la causalidad de acuerdo con un modelo específico. Pero, como veremos en la sección siguiente, los estados excluidos son generalmente de poco interés, porque también habría que eliminarlos por otras razones.

Volvemos a encontrar aquí una sorprendente semejanza con el estado de cosas que se encuentra en la teoría de la relatividad, donde la causalidad se restringe, en forma análoga, a ciertas clases de sucesos: el vínculo causal abarca solamente sucesos que se hallen cada uno en el cono de luz del otro. También aquí la limitación de la causalidad es una consecuencia, que ejerce automáticamente sus efectos, de las leyes del movimiento, sin estar sostenida por una regulación externa. Pero existe una importante diferencia entre las dos situaciones: el principio de exclusión anula completamente todos los estados a los que la evolución causal nunca puede llevar a un sistema, mientras que el principio de relatividad, actuando menos drásticamente, los asigna a algún otro esquema causal [5].

20.6. La "identidad" de los electrones

Puede demostrarse que una función de estado antisimétrica implica las mismas propiedades observables para una partícula que para otra cualquiera. Por ejemplo, la probabilidad de encontrar el electrón 1 en el punto P_1 mientras el electrón 2 esté en P_2 se halla elevando al cuadrado la $\varphi(1, 2)$ de la ecuación (20.2), o sea, es

$$u^2(1)v^2(2) - 2u(1)v(1)u(2)v(2) + v^2(1)u^2(2).$$

Ahora bien, la probabilidad de que el electrón 1 ocupe P_1 independientemente de la posición del otro electrón se obtiene integrando esta expresión sobre el espacio de la partícula 2. Al hacer esto, utilizando ciertas sencillas propiedades matemáticas de los estados, el resultado es $u^2(1)+v^2(1)$; pero una integración análoga extendida sobre el espacio de la primera partícula (y que, por lo tanto, dé lugar a la probabilidad de que la segunda partícula esté localizada en P_2) conduce a $u^2(2)+v^2(2)$, *la misma función* con los argumentos correspondientes al punto P_2. Así, pues, la distribución observable en el espacio de las dos partículas es idéntica, y no hay medición de posiciones capaz de distinguir entre ellas. Y lo que hemos mostrado para la posición vale también para todos los demás observables: las mediciones de la energía y el impulso se mantienen en la misma neutralidad respecto de la identidad de las partículas

[5] Para más detalles, véase H. Weyl: *Raum, Zeit, Materie,* Berlín, Springer-Verlag, 1921; también, H. Weyl: *The Open World,* New Haven, Yale University Press, 1932.

y no nos permiten distinguirlas. Además, la misma indiscriminación prevalece en general para todos los constituyentes de un sistema que contenga más de dos partículas de la misma clase.

El físico habla a menudo de esta circunstancia refiriéndose a la *identidad de los electrones.* Tal vez no sea muy afortunada esta expresión, ya que invita a especulaciones filosóficas que no autorizan los hechos científicos. Es cierto que los electrones caracterizados por una función antisimétrica no pueden ser distinguidos por sus propiedades observables; y si tomásemos esta proposición en el sentido clásico, con todos los observables interpretados como atributos únicamente poseídos, los electrones serían realmente *idénticos,* serían una y la misma entidad. Pues si encontramos siempre dos partículas, en el significado ordinario de este término, en el mismo lugar, con la misma velocidad, la misma energía, etc., habrá que considerarlas como una sola.

En la teoría de los *cuantos,* sin embargo, los observables de los electrones son atributos latentes, y la ingenua conclusión que acabamos de esbozar requiere cierta modificación: una única medición no puede ya revelar de modo significativo las condiciones físicas en que se halle el electrón, mientras que un agregado de observaciones, debidamente efectuadas, puede aportar una información decisiva en este punto. Así, cuando se realizan muchas mediciones de posición es muy fácil asegurarse, resumiendo su distribución, si entran en juego dos electrones o solamente uno; de esta manera, el *número* se convierte en un observable, pese a la indistinguibilidad de las entidades numeradas.

A este respecto sentimos la tentación de recordar el famoso principio de LEIBNIZ de la identidad de los indiscernibles: "*Non dari in natura duas res singulares solo numero differentes*". La plausibilidad de este aserto procede de la experiencia ordinaria, en gran escala, de la comprensión implícita en la física clásica, y está limitada a ese terreno: como hemos visto, la mecánica cuántica presenta claros ejemplos de su violación en el uso del principio de exclusión; debe, por lo tanto, hacerse constar que la conjetura de LEIBNIZ ha dejado de tener validez en la física moderna.

20.7. LA EXCLUSIÓN Y LA ORGANIZACIÓN BIOLÓGICA

Aun antes del descubrimiento de PAULI la física había dejado de ser mecanicista, pues había avanzado más allá de los elementos de la descripción evidentes, perceptibles e intuibles que sugiere la palabra *mecanismo.* Cuando se la analiza más detenidamente se ve que la esencia del razonamiento mecanicista se concreta en dos creencias: primera, que las entidades (en nuestra terminología éstas son las construcciones interpretativas llamadas sistemas) son divisibles en partes, y, segunda, que estas partes son localizables en el espacio y en el tiempo. El razonamiento mecanicista, por lo tanto, mira con especial confianza a aquellas

dos ciencias que tradicionalmente han apoyado estas creencias: la geometría y la dinámica.

Tal vez donde mejor se observe la gradual degeneración de la filosofía del mecanismo sea en las transformaciones sufridas por estas dos disciplinas. No disponemos aquí de espacio para registrar todos sus recientes cambios, pero como hemos expuesto ya muchos puntos de interés a este respecto no estará de más un breve resumen a manera de recuerdo.

Lo principal que le ha sucedido a la geometría en la física, además de una más clara comprensión de su carácter constructivo, es una proliferación de dimensiones: el espacio ordinario tridimensional se ha transformado en el multidimensional espacio de fases de la estadística y en el espacio de configuración de la mecánica cuántica. Este último es de particular importancia, porque ostenta las características de ser esencial e inevitable en la descripción última de la naturaleza, mientras que quizá quepa considerar al primero como un artefacto cómodo.

Lo que ha ocurrido con la dinámica constituye el objeto sobre el que versan los capítulos XVI a XIX: la aparición de observables latentes ha hecho imposible la localizabilidad estricta de las partículas elementales. Tal era el estado de ineficacia en el que el mecanismo se encontraba cuando el principio de exclusión comenzó a iluminar la escena científica.

Con anterioridad a ese momento, todas las teorías afectaban a la naturaleza *individual* de las llamadas "partes"; el nuevo principio regula su comportamiento *social:* con respecto a una sola partícula no tiene nada que decir. Y lo que dice para agregados, aunque muy importante, no puede ser expresado como una regulación *dinámica.* Es como si aquí, por primera vez, la física hubiese descubierto dentro de su propio recinto una ley puramente social, una ley sencilla en su formulación básica, e inmensa, sin embargo, en sus efectos colectivos. Como resultado de este último avance, el razonamiento mecanicista, que ya se había quedado atrás, se ha perdido de vista.

El avance ha conducido también a la física a un terreno más elevado, desde el que pueden divisarse nuevas e inesperadas vías de acceso a territorio extranjero. No muy lejos se halla el campo de la biología, con sus problemas de organización y función, y casi sentimos la tentación de decir que la física moderna puede tener la clave de su solución; pues en el principio de PAULI posee una forma de comprender por qué las entidades muestran en su conjunto leyes de comportamiento distintas de las que las gobiernan aisladamente.

Unos cuantos ejemplos específicos pueden servir para fortalecer esta tesis. En el proceso de formar átomos complejos a partir de sus constituyentes, el núcleo y los electrones extranucleares, la exclusión juega un papel decisivo. (Aquí necesitamos solamente el principio en su forma cualitativa, y lo aplicamos a los electrones que se añaden, uno a uno, al positivo núcleo a medida que pasamos revista a todos los elementos de la tabla periódica; admitimos también que la carga nuclear aumenta

en uno cada vez que se añade un electrón.) El primer electrón, con el que se forma un átomo de hidrógeno, puede moverse de cualquier manera permitida por las leyes cuánticas del movimiento; un segundo electrón, si se presenta solo, se situaría en el mismo estado que el primero, energéticamente más favorable; pero *la presencia del primer electrón fuerza al segundo a un estado distinto de movimiento:* es como si el segundo electrón "supiera" que el primero estaba allí, aun cuando no exista interacción con él mediante fuerzas del tipo corriente. El átomo de helio debe, pues, sus propiedades características a una interacción no dinámica, a una especie de discreto evitarse entre sus partes; mas tal evitarse tiene efectos sumamente importantes y sorprendentes: debido a él, el helio es químicamente inactivo, y el diamagnetismo de este elemento puede hacerse remontar directamente al "tacto" o discreción del segundo electrón. Y así prosigue el proceso a través de 94 o más estadios, en cada uno de los cuales el principio de PAULI, imponiéndose a las tendencias normales de los electrones, decreta cuál será el carácter del elemento del caso.

A medida que avanza la investigación nuclear va haciéndose cada vez más claro que las mismas reglas formales que hemos visto reconocidas en la estructura externa de los átomos gobiernan también la composición de los núcleos. Solamente los constituyentes y, por lo tanto, las fuerzas entre ellos, son distintos en los dos casos: las especies posibles de núcleos están formalmente predeterminadas de la misma manera que las valencias de los átomos.

La serie evolutiva se detiene con el uranio o, si se incluyen los nuevos elementos sintéticos, con el número 96. Se detiene no porque se altere el plan constructivo, sino porque el esquema empieza a requerir lo dinámicamente imposible. La dinámica se afirma a sí misma e impone límites al modelo organizador: el núcleo de un elemento de número atómico 100 es inestable porque poseería demasiados protones repelentes, y esta razón no es muy distinta de las consideraciones de estabilidad que se invocan para la terminación de la serie evolutiva de los mamíferos con el elefante en lo que se refiere al peso y al volumen.

La emergencia de nuevas propiedades en la composición es un fenómeno más bien general en la física moderna, y debe su aparición al principio de exclusión. Cuando se aproximan dos átomos de hidrógeno puede ocurrir que se atraigan o que se repelan mutuamente; este efecto depende del estado de los individuos que formen la pareja y no presenta, por consiguiente, aspectos que sea imposible introducir en el ámbito de la dinámica ordinaria. Supongamos que las fuerzas sean de atracción y que se haya formado una molécula; si ahora se aproxima un tercer átomo, es repelido *siempre:* la alternativa de la atracción ha quedado eliminada. Las fuerzas han dejado de ser aditivas a causa de los veredictos del principio de exclusión: aparece un nuevo fenómeno llamado "saturación" de fuerzas, que no puede interpretarse apelando a las in-

teracciones normales entre dos cuerpos en sentido clásico (cabe considerar la saturación, sin embargo, como una organización incipiente).

Es una lástima que en el momento presente no se puedan seguir mucho más adelante las interesantes perspectivas abiertas por estas observaciones; pues en la detallada aplicación del principio de exclusión al problema de varias partículas surgen dificultades matemáticas, dificultades sumamente fastidiosas que solamente cabe superar mediante cálculos enormemente largos y tediosos, que, además, no prometen un cambio de perspectiva en el paisaje tras la eliminación. Los físicos y los químicos se inclinan, por ello, a continuar a partir de aquí mediante ingeniosas conjeturas y a concentrar sus esfuerzos en obtener resultados de inmediato valor práctico. La impresión es, sin embargo, que en principio comprendemos bien la situación, y si esta comprensión es correcta hemos comenzado a acercarnos prometedoramente al más desconcertante problema de la biología. Libros como *¿Qué es la vida?* [6], de SCHRÖDINGER, son estimulantes indicios de su futura eficacia.

Antes de concluir este examen, echemos una breve ojeada valorativa a uno de los campos de la investigación física en que se han vencido parcialmente las dificultades matemáticas del problema de los *n* cuerpos: la estructura de los cristales. Aquí, el número de átomos similares constituyentes (o iones, o moléculas) es tan grande que las leyes de los grandes números ayudan a resolver el problema. En el proceso de formación de un cristal a partir de sus partes atómicas se ven emerger nuevas propiedades (las cuales no tienen ningún significado con referencia a las partes individuales); entre otras aparecen el ferromagnetismo, la anisotropía óptica y la conductividad eléctrica, "fenómenos cooperativos" todos (el término se utiliza, de hecho, en la teoría de cristales) que deben su origen directa o indirectamente al principio de exclusión.

No hemos alcanzado todavía el estadio de las funciones biológicas, como autoconservación, autorreparación, homeóstasis, etc. Si bien podemos comprender cómo el todo puede ser mayor que la suma de sus partes, no hay ninguna indicación definida de que el principio de exclusión pueda valer para *dividirlos* todos en partes con funciones separadas. Existen, desde luego, fenómenos de descomposición secundaria: los cristales forman dominios de peculiar homogeneidad, cada uno de los cuales contiene gran número de átomos, y tales que entre muchos dominios constituyen el cristal; pero al proseguir esta modesta indicación se perdería uno en injustificadas especulaciones.

El cambio en la descripción física desde su carácter clásico a una forma más abstracta y más libre ha traído consigo la necesidad de principios puramente formales como el principio de exclusión, cuya inmensa fertilidad hemos puesto de manifiesto. ¿Quién puede decir que no se descubrirán otros principios igualmente fértiles ante los cuales los fe-

[6] E. SCHRÖDINGER: *What Is Life?* The Macmillan Company, Nueva York, 1945 [vers. cast.: *¿Qué es la vida?*, 1947].

nómenos del mundo orgánico tal vez se sujeten a explicación científica? El vitalista que se duela de tal usurpación estará siempre en libertad de decir que la física se ha tornado vitalista; y puede incluso asegurar de modo bastante justificado que el principio de exclusión es una de las fuentes del hálito vitalizador.

Resumen

En su forma más simple, el principio de exclusión (principio de Pauli) exige que dos partículas de la misma clase —tales como electrones, protones o neutrones— no puedan estar en el mismo estado en ningún instante. Las antiguas teorías cuánticas interpretaban esto diciendo que dos partículas no podían tener el mismo grupo completo de números cuánticos. Demostramos que la forma matemática, más precisa, de tal principio, que estudiamos en la sección 20.3, es equivalente a aquella formulación bajo determinadas condiciones.

Existe una gran analogía entre esta cuestión y la vieja afirmación de que dos cuerpos no pueden ocupar el mismo lugar al mismo tiempo. Mediante una cuidadosa investigación se averigua, sin embargo, que los cuerpos se evitan unos a otros en la medida en que se asemejan sus velocidades. Quizá la aplicación más espectacular del principio de exclusión es la referida al proceso "constructor" de los elementos, proceso que esbozamos en la sección 20.7, donde se pone de manifiesto también que los distintos átomos deben sus rasgos característicos a una especie de comportamiento social de los electrones que puede resumirse diciendo: cada electrón sabe lo que los otros están haciendo y actúa en consecuencia. (Y este conocimiento no está proporcionado por fuerzas, o interacciones dinámicas, de la especie ordinaria.)

El principio de exclusión introduce una correlación en el comportamiento de las partículas que, aunque sus efectos sean semejantes a los de las fuerzas, no tiene explicación en términos dinámicos. La semejanza con el principio de relatividad es muy fuerte: la relatividad logra explicar ciertas fuerzas (las gravitatorias) por referencia al requisito formal de la invariancia, y la exclusión logra explicar otras fuerzas (*v. gr.*, la valencia química) por referencia al requisito formal de la antisimetría. Ambos son requisitos impuestos sobre la manera en que formulamos nuestra experiencia.

Miramos luego el principio de Leibniz de la "identidad de los indiscernibles" desde el punto de vista de la física moderna, y hacemos ver su fracaso en tanto en cuanto que dos electrones, que no difieren en ningún aspecto observable, continúan siendo, sin embargo, dos entidades.

Finalmente, la sección 20.7 pasa revista a las perspectivas ofrecidas por el principio de exclusión —y, posiblemente, otros principios del mismo tipo formal— para comprender los problemas de la materia viva. Estas perspectivas parecen muy prometedoras.

BIBLIOGRAFIA

MARGENAU, H.: "The Exclusion Principle and Its Philosophical Importance", *Phil. Sci.*, 11:187 (1944).
PAULI, W.: *Exclusion Principle and Quantum Mechanics*, 1945 Nobel lecture, Neuchâtel, 1947.
PAULING, L., y WILSON, E. B.: *Introduction to Quantum Mechanics*, Nueva York, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1935.
SEITZ, F.: *The Modern Theory of Solids*, Nueva York, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1940.
WEYL, H.: *Philosophy of Mathematics and Natural Science*, Princeton de N. J., University of Princeton Press, 1949.

CAPITULO XXI

LOS CONTORNOS DE LA REALIDAD

21.1. Recapitulación

Comenzaba este libro con un análisis de la experiencia, un análisis que reconocíamos incompleto y dirigido, con no disimulada orientación científica, hacia las fases de la experiencia que más aportan a la realidad física. Conscientes de la cómoda falacia que iguala lo que es físicamente real con lo que interese, concedimos desde el principio que gran parte —la mayoría, en realidad— de nuestra experiencia humana activa, con sus politonales cualidades afectivas, con sus desoladas extensiones de monotonía y sus cúspides de súbito júbilo, con su sentido del deber, de la libertad y la responsabilidad, es en la actualidad neutral con respecto a las maneras establecidas de ocuparse de la realidad. Pero no hicimos ninguna predicción de que todo ello habrá de permanecer siempre neutral respecto de los principios por los que la existencia *física* se sostiene.

La distinción central en nuestro análisis de la experiencia se hacía entre sus elementos inmediatos y sus elementos racionales, entre datos y construcciones interpretativas. No pretendíamos que formasen dos grupos de entidades claramente separables y mutuamente excluyentes, con un límite divisorio lo bastante definido como para satisfacer los deseos de los lógicos aficionados a las clasificaciones; pero tal distinción es suficiente a efectos científicos: los importantes resultados de nuestra búsqueda de la realidad son independientes del emplazamiento preciso de la frontera entre sentido y razón; se trata de una distinción que reconocen y sancionan todos los estudios respetables de problemas filosóficos, y, finalmente, tenemos el innegable testimonio de nuestra propia interpretación real de la experiencia: la conducta normal se halla condicionada por el reconocimiento de una diferencia entre pensamiento y percepción.

Los datos tienen un carácter efímero, una espontaneidad rapsódica, una desnudez tan en contraposición con los ordenados instintos que penetran nuestro ser y con la unidad dada de nuestra propia experiencia que resultan inadecuados para formar la realidad. Las construcciones interpretativas, por otra parte, son volátiles, subjetivas y demasiado fértiles en implicaciones lógicas para servir, en su indiscriminada totalidad, como material para el mundo real; contienen, sin embargo, la sólida sustancia lógica que una realidad estable debe contener. Con objeto de

armonizar estos incompatibles elementos y erigir una estructura lo suficientemente firme para permanecer (en realidad, para permanecer de tal modo a la altura de los fugaces ingredientes de todo lo inmediatamente dado que constituya su representación significativa), con el fin de lograr este objetivo se aplica a tales construcciones un proceso selectivo. Este proceso es triple.

La división tripartita que proponemos no es una ordenación seriada de fases a través de las cuales la ciencia (o el sentido común) deba pasar sucesivamente para conferir realidad a sus hallazgos. En la acción, las fases están entrelazadas y pueden presentarse en un orden aleatorio; están incardinadas en la metodología de la ciencia, quedan a menudo oscurecidas a la vista y necesitan ser descubiertas; pero sin ellas ya no puede comprenderse el significado de la ciencia ni el de la realidad.

La primera parte del proceso selectivo —primera en prioridad lógica, no temporal— es la imposición de requisitos metafísicos a las construcciones interpretativas, que produce como resultado un cribado del material racional, similar al refino de la mena bruta a metal útil. La metafísica entra aquí en escena bajo forma de postulados epistemológicos de estructura relativamente sólida, no como certidumbres ontológicas eternamente preformadas ni como directrices sobrenaturales. Cuando se escudriñan con cierto detenimiento estos postulados, o principios, presentan la gama que contemplamos en el capítulo V, con su lista de seis vagamente llamados requisitos. El cumplimiento de estos requisitos hace que la construcción interpretativa del caso sea aceptable a efectos cognoscitivos, pero no garantiza su validez.

Además de este componente lógico de la evolución del conocimiento, esto es, el componente por el que el racionalismo reclama sus derechos sobre la interpretación de la experiencia, reconocemos otras medidas igualmente importantes por las que el empirismo se afirma a sí mismo como árbitro último de validez, medidas que forman las fases segunda y tercera del proceso que conduce finalmente a la realidad. La segunda la hemos simbolizado en el capítulo VI por el circuito de la verificación, y, aunque no puede operar independientemente de la tercera, que es el establecimiento de reglas de correspondencia entre datos y construcciones interpretativas, su estado dentro de la epistemología es único e invita a un estudio por separado.

La unificación tiene su comienzo en lo que hemos llamado el plano *P* de la experiencia o Naturaleza (cf. fig. 6.1), el reino de las evanescentes oleadas de la percepción sensible. Esta limitada concepción de la Naturaleza es el punto de partida clásico de la mayoría de las actuales formas de ciencia, pero no se encuentra así restringida en virtud del carácter de la experiencia y puede muy bien incluir todo lo inmediatamente dado[1]. En todo caso, la verificación avanza desde el plano *P*, con la ayuda de correlaciones, hasta el campo de las construcciones inter-

[1] Esto es, podría incluir un dolor súbito, sensaciones espontáneas de júbilo, deseos irrazonados, etc.

pretativas aceptables, en donde, autopropulsada por el nexo lógico inherente a las teorías, llega a un lugar, o lugares, desde donde una segunda aplicación de correspondencias permite que el enlace verificador emerja por segunda vez en la Naturaleza. Y allí es donde corresponde el solventamiento: la verificación ha tenido éxito si la predicción da en el blanco en el plano P; en otro caso ha fracasado. En el caso de fracaso solamente puede concluirse que algo ha marchado mal, y no existe de ordinario ninguna indicación respecto al origen de la perturbación, que puede radicar en un enlace erróneo entre construcciones interpretativas, en alguna oculta incoherencia que el examen racional podría descubrir, o en una correspondencia equivocada. Pero cuando el circuito se completa con éxito, se dice que el grupo de construcciones interpretativas que entran en él es válido con respecto a las observaciones terminales; las construcciones de esta índole verificadas o validadas de tal forma por un número suficiente de datos son verifactos.

El sentido de la escurridiza palabra *suficiente* adquiere plena claridad sólo a través de un detenido análisis del procedimiento científico, que pone en evidencia el carácter *deductivc* del razonamiento científico. A todo lo largo de este libro hemos intentado un análisis de este tipo, que no es posible compendiar en un breve resumen; pero en el capítulo VI hemos resumido las consideraciones, más específicas, que hacen posible un acuerdo entre predicciones exactas y datos necesariamente indeterminados (consideraciones que suavizan el significado del acuerdo exacto requerido para la verificación).

Los puentes entre la Naturaleza y las construcciones interpretativas están formados por relaciones llamadas aquí reglas de correspondencia, que constituyen el tercer tema de nuestro presente estudio y son idénticas a las correlaciones epistémicas de NORTHROP. Si hubiéramos de formular en una frase el efecto de la física moderna sobre la filosofía de la ciencia, tendríamos que decir que la física moderna ha revelado la función de esta tercera fase de la epistemología; y lo ha hecho aportando nuevas y menos evidentes reglas de correspondencia, reglas que no podían permanecer por más tiempo ocultas bajo los velos de identidades vagamente concebidas. Pues el paso cosificador desde cierto grupo de impresiones sensoriales hasta la construcción interpretativa "piedra" difícilmente exigiría la introducción de nada tan pretencioso como una regla de correspondencia, y el análisis puede perfectamente permitirse el lujo de pasarla por alto; y tampoco hay mucha necesidad de reconocer su función, más bien trivial, en ninguna de las correlaciones efectuadas a través de modelos intuibles, tan habituales en la física clásica. Pero cuando se tiene que establecer una conexión entre la posición de las agujas de un reloj y la hora de la relatividad, o entre las múltiples y discordantes observaciones del impulso de un electrón y su estado cuántico, aparece una nueva clase de puente, un puente que no es ni lógico ni empírfico, sino nada menos que un elemento metodológico distinto por derecho propio: es como si el concepto de identidad entre

lo percibido y lo construido, sostenible hasta cierto punto en la física clásica, se hubiese abierto hasta formar una especie de identidad de acción a distancia que constituye la sustancia de nuestras reglas de correspondencia.

Como hemos demostrado, estas reglas son a menudo definiciones operacionales; y su sanción procede siempre de su éxito en múltiples aplicaciones. Sin ellas las construcciones interpretativas son vacuas. Sabemos perfectamente que cambian en el curso del progreso científico, y sabemos que cambian más rápidamente que los principios metafísicos, pero su vida es más larga en conjunto que la de aquellas construcciones, que cambian con cada descubrimiento importante.

Dentro del limitado grupo de construcciones interpretativas que pueden reclamar el rango de verifactos en cualquier momento, pueden distinguirse *sistemas, observables* y *estados,* si bien ésta no es una clasificación exhaustiva. La propiedad de la realidad física es cosa que primariamente les afecta a estas construcciones, y nosotros sugeríamos que se les limitase a ellas. Cosas tales como los valores instantáneos de un observable (como, por ejemplo, la asignación de la cualidad "rojo" o de la longitud de onda de 6.800 unidades angstrom a un objeto que emita luz en un instante determinado) caen en una zona crepuscular de realidad, donde no se pide un claro veredicto y donde la preferencia personal puede muy bien decidir, en el estado actual de la ciencia, sobre la momentánea realidad del color; pero las cuestiones de este género no carecen nunca de significado; señalarlas con esa marca es denegar para siempre a la ciencia una decisión razonable en esas materias. Primariamente, pues, consideramos como contenido del mundo real los verifactos llamados sistemas, observables y estados.

Observamos entonces cómo esta colección de entidades reales, curiosamente, deja de recibir la aprobación pública, porque excluye los hechos palpables de la Naturaleza. Habiendo, no obstante, llegado a la conclusión, sobre bases sólidas, de que los datos y las construcciones interpretativas no pueden definir ambos una única realidad física (pues si se los reúne indiscriminadamente volvemos a obtener de nuevo toda la *experiencia),* decidimos examinar qué entiende el lenguaje por la "realidad" de percepciones, datos, etc.; y descubrimos que con ello quiere decir autenticidad e historicidad, quiere decir que hayan ocurrido efectivamente tal como lo garantice la memoria. Esto nos llevó a reconocer la realidad *histórica* como un complemento de la realidad *física,* al menos hasta el punto en que la historicidad se conserva en la memoria. Pero cuando el recuerdo de las impresiones se hace oscuro, cuando las impresiones anteceden al recuerdo y cuando el recuerdo de un suceso no es nuestro propio, el acontecimiento perceptual se convierte en una construcción interpretativa, que necesita ser verificada; y así sucede con la realidad histórica que, a medida que retrocede en el pasado de nuestra propia experiencia, se funde con la realidad física y elimina la necesidad de distinguir una de otra.

21.2. La realidad en la física cuántica

En la mecánica cuántica el problema de la realidad parece centrarse en el significado de los estados. En ella resultó claro por primera vez, no sin un estremecimiento de sorpresa para el físico, que incluso un estado físico, previamente considerado como una agradable y ordenada colección de observables poseídos, engranados y en funcionamiento como las ruedecillas de un reloj, es de hecho un compuesto de observables latentes enlazados con la Naturaleza mediante reglas de correspondencia de tipo estadístico. Si nos adherimos a la tesis de que los estados tienen realidad física, estamos admitiendo, sin duda alguna, la irrelevancia para la realidad física de un solo dato aislado; y, por otra parte, un solo dato *es* relevante para la realidad histórica, sea cualquiera la concepción que se adopte acerca del significado de los estados.

Puede uno desafiar a la teoría de los *cuantos* y continuar considerando los sucesos y observaciones individuales como componentes de la realidad física, identificando así realidad física e histórica. Al hacerlo, sin embargo, tropieza uno de bruces con dos de las más graves dificultades que han amenazado jamás a una ciencia. La primera aparece expuesta en el capítulo VI, donde nos ocupamos del trasfondo indeterminado de toda percepción inmediata: incluso en *presencia* de convergencia externa de los datos (el tipo de convergencia que falla en la mecánica cuántica) el problema de la convergencia interna suscita cuestiones lo bastante graves como para hacer dudoso el significado de un solo dato en relación con la realidad. La segunda dificultad es la siguiente: comoquiera que solamente los estados (las funciones φ) están sometidos a las leyes de la naturaleza—y nos referimos aquí a lo que antes hemos denominado "leyes del movimiento", el formalismo más fundamental por medio del cual la realidad se propaga en el tiempo—, y dado que los datos aislados no están sometidos a ellas, nunca puede hacerse que los componentes de la realidad histórica satisfagan los requisitos metafísicos característicos del procedimiento científico; y tampoco pueden ser verificados. No existe, por tanto, alternativa; es preciso admitir los estados φ de la física moderna como partes válidas de la realidad física.

Los sistemas mismos han experimentado solamente cambios sin importancia. Estos cambios comprenden, desde luego, la renuncia a muchas propiedades intuibles, y esto parecerá a muchos una desviación radical. Pero la crítica de los modelos se ha venido desarrollando durante mucho tiempo, y la prohibición declarada por la física cuántica apenas es otra cosa que la culminación de un camino largo tiempo recorrido. En conjunto, los sistemas han conservado los mismos observables que siempre tuvieron, pero los observables son latentes: las partículas elementales conservan todavía los atributos de masa, posición, impulso, etc., aunque decir que "tienen" posición en el antiguo sentido es ambiguo.

Volviendo de nuevo a los estados: puede ocurrir que algunos lectores se pregunten a qué viene tanta insistencia. La "crisis" de la física ha ocupado quizá nuestra atención hasta una medida destructiva de más amplias perspectivas. Debemos apuntar, por lo tanto, que la idea de estado ahora establecida en la mecánica cuántica no es nueva para la ciencia; su precursora lleva mucho tiempo aceptada en la biología. Desde los días de GREGOR MENDEL (1866), o, mejor, desde el tardío descubrimiento de su obra en 1900, la teoría cuántica de los estados ha sido utilizada con éxito en genética. Por tomar un conocido ejemplo, consideremos el dondiego de noche *(Mirabilis jalapa),* que tiene dos estirpes puras, la variedad roja y la blanca que designaremos respectivamente con *r* y *b.* Cuando se cruza una flor roja con una blanca, todos los miembros de la primera generación filial son híbridos rosas, a los que vamos a aplicar la abreviatura *s.*

Supongamos ahora que el cruce se produce entre estos híbridos. Cada ejemplar de la segunda generación filial tendrá, ciertamente, una de las tres propiedades observables, *r, b* o *s,* y la revelará cuando florezca: antes de que brote en él flor alguna se encuentra en un estado definido y, diríamos, perfectamente *real,* que, sin embargo, solamente cabe describir indicando que la probabilidad de que el ejemplar sea *r* es 1/4, de que sea *b* es 1/4 y de que sea *s* es 1/2; la "medición" debe esperar en este caso hasta que el capullo florezca. Y tampoco una sola "medición" llevada a cabo sobre un ejemplar escogido al azar definirá un *estado,* siempre que entendamos por estado su generación con respecto al cruce de determinadas estirpes puras (pertenecientes, por ejemplo, a la segunda generación filiar que acabamos de considerar), pues si la flor resulta ser *s,* por ejemplo, no se puede concluir que pertenezca a la segunda generación filial: las generaciones sucesivas tienen también miembros de este tipo, aunque con diferentes distribuciones probabilísticas. Obsérvese también que la primera generación filial es un estado propio con respecto al observable "color" y que su valor propio es *s.*

Si el pertenecer a alguna generación específica (con respecto al cruce de dos variedades puras) es un atributo real del *Mirabilis jalapa,* entonces es muy difícil entender por qué la realidad de los estados mecánicos cuánticos habría de plantear ninguna cuestión grave.

21.3. ¿POR QUÉ NO UN SIMPLE REALISMO?

Nuestras vidas irreflexivas proclaman la verdad del realismo: en sus actividades normales todos los hombres admiten tácitamente la existencia previa de un mundo externo del que ellos son partes únicas e insustituibles. Esto es también un hecho de experiencia, y una teoría del conocimiento que sea razonable debe proporcionar una explicación de él; mejor dicho, es algo más que un *hecho* de la experiencia, pues los dogmas prácticos del realismo iluminan e informan todo el conjunto

de nuestra experiencia no especulativa. A menos que la teoría presentada en este libro concuerde con ese reconocimiento, a menos que el realismo sea, como si dijéramos, una primera aproximación a él, la teoría no tiene ningún mérito.

Ahora bien, con respecto a las cuestiones de la experiencia de cada cual, como, por ejemplo, la realidad de los objetos de nuestras vidas diarias, la concepción construccional que hemos ofrecido llega exactamente a las mismas consecuencias fácticas que el realismo, sea ingenuo, reformado o crítico. Sólo que tiene que mantenerse torpemente en equilibrio sobre zancos, dando muchos pasos hacia su objetivo, mientras que el realismo camina hacia él con andadura normal; ello se debe a que en los sencillos actos de cosificación que imparten significado a las cogniciones primitivas, las reglas de correspondencia son tan evidentes y el tránsito efectuado con su ayuda tan breve que esas reglas resultan carentes de interés; y en su ausencia el proceso de conocimiento se convierte en una serie de escalones "causales" en los que un elemento de la experiencia "sugiere" otro por asociación o de otro modo. Comoquiera que los territorios unidos por reglas no reconocidas son siempre, o parecen serlo al menos, adyacentes, la distinción entre datos inmediatos y construcciones interpretativas parece fuera de lugar, y puede muy bien prescindirse de ella en favor de una especie de interacción entre un mundo real y unos organismos sentientes. El realismo, por tanto, puede ser considerado como una primera aproximación a las complicadas formulaciones que hemos intentado, una aproximación que se halla en la región de la experiencia interpretable por "breves" reglas de correspondencia, la región próxima al plano *P*.

Aunque la equivalencia que acabamos de establecer es verdadera en todos los aspectos prácticos, dentro de los límites expresados subsiste la inmensa diferencia metafísica contenida frecuentemente en la tesis realista de que el mundo físico está fuera de la experiencia, tesis que negamos. La ventaja obtenida por ello es una irreductible especie de unidad que adhiere al ego que experimenta, comparable a la distinción otorgada al globo terrestre por la hipótesis de PTOLOMEO: en nuestra opinión, el ego que reflexiona (no que experimenta) es inicialmente una construcción interpretativa que debe ser verificada, una construcción de notable universalidad, que permite la autorreferencia de todas las partes de la experiencia. Que tal autorreferencia sea posible y, por consiguiente, que pueda ser verificada la construcción interpretativa que es el ego es bastante digno de mención (tal vez sea, en realidad, el hecho más digno de mención de nuestra experiencia); mas no por ello se halla exento de examen racional y empírico.

No queda desbaratada esta tesis por la objeción de que suponemos y verificamos la existencia no sólo de nuestro propio yo, sino también de los *otros* yóes. No existe razón—podría argüirse—por la que cada uno de nosotros no pueda considerar *su* experiencia como construida y verificada de la manera que propugnamos, independientemente de que

haya ocurrido en sus inmediaciones; pero cuando existen otros yóes haciendo la misma construcción y verificación, ¿no debe haber otra dimensión en la que estos yóes existan como individuos dignos de mención? La respuesta es que no necesitamos una dimensión adicional para que entren los otros yóes; pues asentamos la autorreferencia de gran parte de nuestra propia experiencia teniendo en cuenta la siempre presente posibilidad de una transición entre dos tipos de experiencia estrechamente relacionados entre sí, el estar consciente de algo, y estar consciente de estar consciente de algo, tipos que están enlazados por una regla de correspondencia que tiene un amplio ámbito de aplicabilidad, y la totalidad de las construcciones interpretativas enlazadas por esta regla a la Naturaleza, unidas en una gran abstracción, forma nuestro yo. No existe diferencia esencial entre este resultado y la verificación de una construcción interpretativa física como la masa. Y si no hay paradoja en la asignación de masa a tipos de experiencia más remotos que en aquella en que se asentara primeramente, si estimamos apropiado imputar masa a los fotones y a todas las demás formas de energía, entonces no hay nada gratuito en el acto de transferir la autorreferencia que está confirmada en ciertas partes de nuestra experiencia a otras donde no cabe comprobarla directamente, es decir, a otras personas.

Para expresar la cuestión de otra manera, podría uno decir que la noción del yo surge de la experiencia de un consciente de segundo orden, si puede utilizarse esta expresión para describir el estado de estar consciente de estar consciente de algo. En este sentido, el yo de otros es una certificación de la posibilidad de la consciencia de tercer orden. Evidentemente, es posible también una consciencia de cuarto orden, que denota que alguien está pensando en la consciencia de una tercera persona, y así sucesivamente; todo esto puede describirse satisfactoriamente dentro de mi propia experiencia, y está claro que si sucumbimos una vez a la tentación de reconocer la existencia de la *única* dimensión metafísica suplementaria que el realismo exige no hay forma de evitar la estúpida carga de una infinita jerarquía de dimensiones, encajadas sucesivamente, muy semejante a la serie de espacios de ZENÓN[2].

Levantar el vuelo para perderse en generalidades como las precedentes no se considera de buen gusto por los hombres de ciencia modernos, y nos apresuramos a volver a tierra con una lección más sencilla, que quizá les resulte de interés. El realismo, cierto, representa una aerodinámica versión de la metodología de la ciencia, satisfactoria como hipótesis de trabajo. ¿Por qué, entonces, ha de molestarse el científico en tratar de ir más allá de él?

La contestación es doble. En primer lugar, la versión simple de él es incapaz de representar correctamente las partes de la experiencia

---

[2] Una de las paradojas de ZENÓN dice así: "Si todo lo que existe estuviese en el espacio, éste tendría también que existir en el espacio, y así sucesivamente."

científica que adquieren significación merced a reglas "largas" de correspondencia: no logra explicar las regiones más remotas del campo *C*. En segundo lugar, renunciar a la cuidadosa circunspección que impone una epistemología más elaborada implica un peligro para la ciencia y para el progreso humano: la actitud del realismo, del idealismo, o cualquier actitud que proyecte una fase aislada de la experiencia más allá de los confines de la experiencia misma, abandona el control sobre la realidad a agentes de dudosa competencia; y deja a la ciencia indefensa ante hadas, fantasmas y duendes, pues, como hemos tratado de demostrar, a menos que se le encuentre en el contrapunto entre la construcción interpretativa y la verificación, no existe criterio alguno para garantizar la realidad y para situarla aparte de lo irreal.

Puede parecer extraño al lector filosófico que haya yo elegido repetidamente el realismo como blanco de mis ataques directos, y algunos podrán decir justamente que no he sido demasiado específico en la elección de blanco (ya que existen muchas clases de realismo); peor aún, he de ser criticado por haber reavivado algunos viejos argumentos, ya fríos. En respuesta a estas acusaciones ofrezco solamente esta excusa: había necesidad de hacer tales cosas. Pues el realismo, por lo general en alguna forma inarticulada y no específica, a la que perturban las distinciones sutiles, es la filosofía del científico práctico; y me ha parecido que la mejor manera de despertar su interés filosófico era atacar este crucial centro de complacencia. Así, pues, si bien el realismo es una buena escuela para los científicos, es también una dura escuela en la que poder graduarse, y este libro ha pretendido ofrecer una ayuda para tal graduación.

21.4. Otras clases de realidad

Nuestra única finalidad hasta el momento ha sido presentar una clara perspectiva de la realidad *física* y de los medios por los que se la asienta; y al hacerlo nos ha parecido necesario trabar conocimiento con un tipo de realidad distinto del de nuestra investigación principal, y, sin embargo, estrechamente asociado con ella: la realidad histórica, el género de ella que el científico encuentra en sus datos. Ahora bien: como ya se acerca el final del presente libro, nos es lícito tal vez tomarnos ciertas libertades y pasear la vista por los márgenes del problema que nos ha ocupado para ver si existen aún otros tipos de realidad y qué derechos pueden esgrimir a ser objeto de atención.

Sería miope el filósofo si no divisara su presencia. A efectos de conveniencia los situaremos en dos clases, que denominaremos *A* y *B*. La clase *A* contiene tipos de realidad intrínsecamente inalcanzables por los métodos descritos en este libro; la clase *B* los tipos que, según es concebible, pueden ser puestos de manifiesto mediante una aplicación del método científico más amplia de lo que hemos hecho hasta el mo-

mento. Pero antes de examinarlos nos detendremos brevemente a resumir algunos aspectos esenciales, considerados frecuentemente como deficiencias, de la realidad física, aspectos que proporcionan perennes motivos para una búsqueda de otros tipos.

El primero de ellos es el carácter *inmanente*—por utilizar una expresión kantiana—del método científico y de la realidad física: siendo parte de la experiencia, la realidad física no puede funcionar como el por qué de la experiencia, de modo que, ante ella, el hecho de la experiencia permanece como un insondable misterio. Aunque la explicación dada en este libro pueda parecer pretenciosa por ser sistemática o por intentar ser completa— y sé lo desaconsejable que es hoy en día escribir filosofía sistemática—el por qué de la experiencia y, en consecuencia, el por qué de la realidad son problemas que no trata de resolver: desde luego, la realidad puede no tener ninguna *causa* en el sentido físico de la palabra; esto invalida nuestra formulación de la cuestión, pero no su significado. En este punto se retira el científico, y entra en escena el filósofo de la existencia.

El nacimiento de filosofías existenciales en nuestro tiempo, además de manifestar la grave preocupación afectiva de la Humanidad por el estado actual del mundo, podría también ser considerado como indicio de un creciente reconocimiento o admisión de la clase de razonamientos que llena este libro. Pues, al dirigirse precisamente al problema fundamental dejado en pie por el método científico, estas filosofías aceptan en gran medida, por implicación, lo que ese método enseña. Parece que la división entre filosofía de la ciencia y filosofía de la existencia representa la única fisura natural, y quizá la definitiva, del campo filosófico, y acaso se encamine la historia en la dirección de aceptar esa división.

Hemos dicho que la inmanencia es un notable aspecto de la realidad física que ha impulsado la especulación más allá de la ciencia. El otro es la cualidad dinámica de la realidad física, llamada impermanencia por sus detractores. Según nuestra concepción, la realidad cambia cuando se realizan nuevos descubrimientos; pero nuestro adoctrinamiento en los principios del ser y nuestra ocupación histórica con inmutables nos hacen querer decir que nuestro *conocimiento* de la realidad cambia cuando se realizan nuevos descubrimientos. Siempre que no se hace uso filosófico de tal afirmación, esto es, siempre que la hace el científico, es inofensiva, naturalmente; pero cuando, por el contrario, se la toma como punto de partida de empresas filosóficas, la investigación se desliza por un cómodo declive hacia un territorio inexplorado: de esta manera, la insatisfacción por los aspectos dinámicos de la realidad física, juntamente con el deseo, más legítimo, de una solución al enigma básico de la existencia, ha motivado las tentativas de la clase *A* (que habíamos definido hacia el principio de la presente sección), intentos que tratan de componer la realidad por métodos esencialmente incontrolados por la ciencia. Volvemos ahora sobre ellos.

A_1. Ya hemos mencionado la teoría de la convergencia (capítulo V).

Acepta en conjunto la epistemología de la ciencia, pero la sitúa junto a una creencia en la unicidad o predeterminación del progreso científico, cuyo fin determinaría lo verdaderamente real. Es una curiosa mezcla de conocimiento y creencia, una definición de lo real a base de un ideal: la ciencia no da ninguna seguridad de convergencia final, ni niega tampoco la posibilidad de convergencia; y de ahí que la fe en cuestión no quede excluida por razones científicas. Es un poderoso y razonable concomitante del procedimiento científico, pero no puede definir la realidad física: no puede demostrar que los átomos, piedras y estrellas son reales de la manera en que la ciencia afirma su realidad. El postulado de convergencia es, de hecho, una teoría de la historia, y no de la ciencia.

A_2. Hay cierta concepción, a la que se llama realismo crítico o, en el caso de KANT, idealismo crítico, que trata de asentar la permanencia en el reino del ser postulando una forma primaria y otra secundaria de realidad física. Ilustremos gráficamente la cuestión. En la figura 21.1, *P*

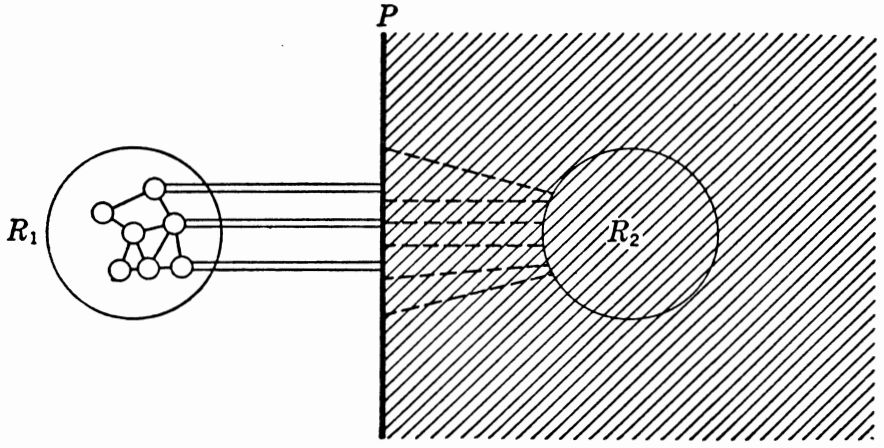


Figura 21.1

es de nuevo el plano de la percepción y R_1 es el conjunto de verifactos que constiuyen la realidad de acuerdo con nuestra manera de ver las cosas. La teoría de que nos estamos ocupando supone la existencia (en un sentido no definible por ninguno de los procedimientos considerados en este libro) de una contrapartida de R_1, que aquí denominamos R_2, en la región sombreada (no perceptible) que se extiende más allá de *P*. Los constituyentes de R_1, la realidad primaria, "hacen" en cierto modo que surjan datos perceptiblemente en *P*. La relación entre R_2 y *P*, y, finalmente, por lo tanto, entre R_1 y R_2, puede o no ser intrínsecamente incognoscible; en este último caso, la región sombreada, aunque inaccesible a la percepción directa, está abierta a la inferencia por procedimientos en R_1. Mas, cualquiera que sea la suposición que se adopte, las partes de R_2 no son reales en el mismo sentido en que son reales los

átomos, las piedras y las estrellas; debemos decir, por consiguiente, que R_2 no define la realidad *física.*

Las teorías rotuladas A_1 y A_2 pueden, desde luego, reunirse, pues es perfectamente natural para quien proponga A_2 considerar la realidad primaria como la entelequia responsable del progreso científico y de su unicidad. Y, evidentemente, existen muchas otras concepciones que pueden ser conformadas sobre el modelo de estas dos; pero tienen muy poco que ver con el tema de este libro, por las razones que ya hemos indicado.

B_1. Nos volvemos, pues, a los modos de realidad pertenecientes a la clase B (cf. más arriba), realidades que se encuentran esencialmente al alcance del método científico, pero aún no abarcado por él. El ámbito en que puede moverse la especulación es aquí ilimitado, pues ¿quién puede profetizar qué resultados puede producir una aplicación continuada de la epistemología, aun en su forma actual, a la psicología y a las ciencias sociales? Y, lo que es quizá más importante, es probable que algunos descubrimientos inesperados en estos campos menos desarrollados puedan ocasionar un cambio o una ampliación de la actual metafísica que introduzcan muchos fenómenos ahora científicamente oscuros dentro de lo captable por el método científico. Qué sucedería, por ejemplo, si el postulado de causalidad quedase verdaderamente abandonado o si se adoptasen la lógica polivalente y sus consecuencias matemáticas, son cosas que en la actualidad suscitan grandes conjeturas.

Pues puede existir ciencia sin causalidad, una ciencia en la que incluso las leyes fundamentales cambien en el tiempo. Algunas teorías cosmológicas intentan esta radical innovación, bien suponiendo que ciertas constantes universales de la naturaleza (como la velocidad de la luz o la carga del electrón) cambian lentamente de valor a medida que pasa el tiempo, bien permitiendo que las leyes de la naturaleza sean diferentes en edades distintas del universo. Si tal cambio metodológico llegase algún día a ser aceptado, esto es, si los científicos admitiesen variaciones temporales de las leyes sin esforzarse en encontrar una explicación causal a esas variaciones, las ciencias de la vida podrían resultar extrañamente afectadas: las leyes que regulan un organismo en su infancia podrían entonces ser distintas de las que gobiernen su comportamiento en la adolescencia; el problema psicológico del aprendizaje, el problema de los instintos y las destrezas nativas del hombre y de los animales aparecerían bajo una luz diferente, y tal vez estuviesen más cerca de ser resueltos. Pero tales soluciones no se consideran hoy, por lo general, aceptables, dada la metafísica que solemos admitir.

Mucho más difícil es imaginar el efecto sobre la ciencia de un abandono de la lógica bivalente, si bien no parece haber nada en la actual estructura de las ciencias exactas que sugiera tal apartamiento; esto se debe a que todas nuestras teorías actuales se apoyan, en último término, en un conjunto limitado de operaciones matemáticas, como la ley de la suma de números enteros, y con respecto a estas leyes *tertium non*

datur: una ecuación como $p+q=r$ es *en principio* o verdadera o falsa; es completamente imposible elegir enteros para los que esta proposición sea cualquier cosa menos verdadera o falsa. Cabe introducir, desde luego, una tercera categoría, la de "absurda", violando la regla de que estos elementos han de ser números enteros; y una proposición tal como "un elefante+América=9" pertenece, indudablemente, a esa clase. Pero no hemos desarrollado hasta el momento ningún tipo de matemáticas utilizables que presten la más mínima atención a tales proposiciones—o más bien, en realidad, que no se derrumben cuando éstas se incluyan en ellas.

REICHENBACH[3] cree que la mecánica cuántica representa una aplicación de los cálculos polivalentes a la física. Nos tememos que esta sugerencia violente los arraigados hábitos de esa rama de la ciencia: del lado experimental, una observación revela siempre una de dos alternativas solamente, ya que responde sí o no a toda pregunta aceptable; y por lo que a la medición concierne, un electrón o está presente dentro de un volumen dado o no lo está. El hecho de que uno no pueda extraer las usuales inferencias concernientes al destino del electrón de dicha observación es responsabilidad exclusiva de las leyes de la naturaleza, y no de las leyes de la lógica: en un sentido fundamental no es más significativo que la trivialidad de que el tamaño de un buque no permita ninguna conclusión respecto al nombre de su capitán.

Y del lado de la teoría la situación es, en lo esencial, igualmente simple, aunque distinta: cuando el estado de un electrón está dado, una afirmación como "el electrón está en *xyz*" no es ni verdadera ni falsa: es, de hecho, tan oscura como "el electrón es azul" e igualmente carente de interés; no se pregunta por ella ni forma parte de la teoría basada en aquél. Pero la predicción "la probabilidad de encontrar un electrón en un volumen dado (debidamente interpretada como frecuencia de observaciones) tiene el valor 1/2" es siempre o verdadera o falsa, y puede ser verificada o refutada.

Los cambios en la metafísica de la ciencia se han producido muy lentamente en el pasado, se han producido como último recurso de explicación tras ciertos descubrimientos fácticos. Mas si ocurrirá lo mismo en el futuro o si estamos entrando en una era en que los hombres, más conscientes de su metafísica, experimentarán fructuosamente con ella, es algo que nadie puede decir (hacerlo sería una nueva forma de experimentar con la realidad).

B_2. Se producirán profundos cambios en el significado de la realidad si el ámbito de los datos, el plano P de la experiencia, se amplía, aunque todos los demás elementos del método permanezcan iguales. Una vigorosa defensa de la tesis de que semejante ampliación es deseable procede de los fenomenólogos, que quieren extender el área de la inme-

[3] H. REICHENBACH: *Philosophical Foundations of Quantum Mechanics*, University of California Press, Berkeley, 1944.

diatez de forma muy interesante: "La 'visión' directa—dice HUSSERL[4]—, no meramente la visión sensible, empírica, sino la visión en general como forma de conciencia en que se da algo originariamente, cualquiera que sea esta forma, es el último fundamento de derecho de todas las afirmaciones racionales. La intuición de esencias es un acto en el que se dan originariamente y, en cuanto tal, un acto análogo a la percepción sensible..." Así, estudiando ciertas fases de la conciencia pura, mediante una *Wesensschau* directa, la fenomenología quiere descubrir los datos que posean al menos el carácter fidedigno de la experiencia sensible a la que la ciencia limita ahora su atención, y espera discernir lo que denomina verdad "eidética", el componente estable de una filosofía "sin presupuestos".

La ciencia es probablemente demasiado reservada en su resistencia a hacer honor a la evidencia introspectiva, y el oportuno desafío de la fenomenología sólo puede ser estimulante para ambas disciplinas. Debe comprenderse, sin embargo, que una admisión acrítica de las llamadas estructuras eidéticas de la conciencia en pie de igualdad con lo que ahora se consideran datos científicos sería totalmente desastrosa; cosa que no se debe a que las primeras sean intrínsecamente menos verdaderas que los segundos (lo cual sería un juicio erróneo)—mi incapacidad para concebir un objeto que sea al mismo tiempo grande y pequeño está tan asegurada como la percepción que revela que un objeto es grande—, pero más bien porque ni los datos introspectivos ni los externos llevan consigo dentro ninguna garantía de autenticidad: la *ciencia* ha podido formular teorías proporcionando criterios para rechazar los datos ilusorios; y hasta que se cuente con criterios similares para excluir introspecciones abortivas, el científico tiene derecho a mostrarse escéptico respecto de las proposiciones de la fenomenología y respecto de las formas de realidad que ésta contempla.

21.5. LA REALIDAD FÍSICA Y LOS VALORES

La sección anterior ha versado sobre los intentos de ampliar la realidad física y sobre sus perspectivas, pero hemos limitado la atención a los problemas de la apercepción fáctica y del conocimiento. Todos estos intentos comparten con la filosofía expuesta en este libro la cualidad de ser insuficientes para la representación de la experiencia humana, por lo menos en dos campos importantes, las esferas del sentimiento y de

---

[4] E. HUSSERL: *Ideas* (trad. de W. R. B. Gibson), Harvard University Press, Cambridge de Mass., 1943 [ed. orig.: *Ideen zu einer reinen Phänomenologie und phänomenologischen Philosophie,* Halle del Soale, Niemeyer, 1913; vers. cast. de J. Goos (con las correcciones y adiciones de la edición crítica de 1950, en la colección "Husserliana", La Haya, Nijhoff): *Ideas relativas a una fenomenología pura y una filosofía fenomenológica,* México, F. C. E., 1962 págs. 50-58]. Véase también M. FARBER: *The Foundations of Phenomenology,* Harvard University Press, Cambridge de Mass., 1943.

los juicios de valor. No es incumbencia, naturalmente, del filósofo decir que estos defectos son necesarios y debidos a las limitaciones *fundamentales* del método científico, ni tampoco se halla el científico en libertad para negarlo: la actitud adecuada por parte del filósofo es mantener una mentalidad abierta, mientras que la misión del científico es, evidentemente, reconocer las deficiencias que haya e intentar luego su eliminación. Puede que no lo consiga: puede que la ciencia tenga limitaciones esenciales que no son visibles en la actualidad; pero el beneficio para la Humanidad que podría agregarse al éxito es lo suficientemente grande como para justificar el esfuerzo en pos de la más mínima ocasión.

No caigamos presa de una absurda y fraudulenta argumentación amañada por los enemigos de la ciencia: la de que si la ciencia regulase las emociones, juicios y acciones de la Humanidad, los seres humanos se convertirían en meros autómatas y la vida no valdría la pena de vivirse. Pues existe una gran diferencia entre comprender los fenómenos lo bastante bien para controlarlos (cuando esté indicado el control) y no comprenderlos: el conocimiento de las leyes del movimiento de los cuerpos materiales no disminuye el placer que se encuentra en jugar a los dados o a cualquier otra actividad en la que, por diversión u otra finalidad, prescinda uno del tratamiento científico y se entregue a las agradables sorpresas del azar; pero tal conocimiento sí ayuda en la construcción de casas y de automóviles. Decir que estamos destinados a convertirnos en robots si el funcionamiento de la sociedad se conociese tan bien como el comportamiento de los gases es un error, porque *conocer* y *regular* son cosas distintas. La ciencia no puede crear valores; solamente ella, sin embargo, proporciona los medios para su realización.

La indiferencia de la realidad física con respecto a las cualidades afectivas de la experiencia es cosa reconocida generalmente, y no es preciso que hagamos ahora hincapié en ella. Una persona querida para mí es una construcción interpretativa válida en el mismo sentido que el paraguas que guardo en el armario y, por consiguiente, no más real que él. Evidentemente, este tipo de proposición omite una gran riqueza de aspectos más apreciados en la vida que los hechos de la realidad; pero tampoco aquí es seguro que los procesos de comprensión científica, y con ellos la idea de realidad, no puedan ser ampliados suficientemente para expresar esa riqueza suplementaria de la experiencia. Hubo un tiempo en la historia de la joven ciencia de la colorimetría en que la representación estaba limitada a las dos dimensiones de tonalidad y brillantez, y los hombres tenían razones para sospechar que esa ciencia nunca llegaría a poder expresar la viveza de las sensaciones de color reales; hoy en día, con la introducción de la saturación como tercera variable en la descripción del color, nos encontramos mucho más cerca de esa meta; y otro tanto puede suceder con la representación de las emociones.

Por lo que se refiere a los valores, sin embargo, la cuestión es algo diferente. En mi opinión (que no es la única compatible con la teoría

epistemológica que hemos presentado en este libro y que, por consiguiente, no puede ser defendida sin apelar a convicciones extracientíficas), la ciencia natural no contiene principios *normativos* que se refieran a objetivos últimos: la realidad física es la quintaesencia de la experiencia cognoscitiva y no de los valores. Su significación se expresa a base de *relaciones* estables entre fases de la experiencia y, como extrae su fuerza de relaciones, la realidad no puede crear un incondicional "has de...". Conocer la realidad física es saber dónde mirar cuando se quiere o se necesita ver algo: es poder curar cuando se desea una curación, matar cuando es la muerte lo que se pretende; pero la ciencia natural no dirá nunca si es bueno o malo mirar, curar o matar: simplemente, carece de toda premisa de "deber".

Ahora bien: es muy fácil deslizar de contrabando en la ciencia algunos deberes: cabe decir que la psicología, la antropología y la sociología pueden determinar lo que es bueno para la especie humana, considerar esto como un descubrimiento científico y basar sobre ello un código científico de ética. La múltiple referencia en ésta y otras propuestas análogas a la ciencia va involuntariamente dirigida a camuflar el hecho de que la proposición es realmente una recomendación de hedonismo, si bien en forma moderna y altruista, pero que nunca puede relevarnos de la necesidad de un compromiso último no científico, en este caso de entregarnos nosotros mismos a la máxima de que *es bueno buscar la meta del hedonismo.* Metodológicamente, la aceptación de esta "doctrina" o de cualquiera de sus competidoras en el campo de la ética es la contrapartida de una aceptación de los principios y postulados de la ciencia. Como consecuencia de hallarse radicados en partes distintas, si bien en el mismo estrato básico de la experiencia, los postulados morales no son reducibles a postulados científicos, ni a la inversa; y para mí, la incapacidad de reconocer esto representa un obstáculo para el progreso, tanto de la ciencia como de la filosofía, que sería comparable al error cometido por el metafísico a la antigua usanza que considera la ciencia como descripción de alguna especie preformada de ser.

Debido a esta irreductibilidad, sin embargo, surge la posibilidad de erigir la ciencia y la ética como estructuras paralelas, de utilizar los principios *formales* de la ciencia en un esfuerzo por hacer más firme y más universal el atractivo de la ética. Esta posibilidad se vislumbra ahora como una vaga aunque prometedora conjetura, a la que solamente podemos aludir en este libro; sin embargo, debería quizá decirse que las consideraciones que en él hemos estampado han estado en gran parte provocadas por la esperanza de que la claridad acerca del método científico, una vez conseguida, pudiera más tarde conducir a una decisión sobre la aplicabilidad de método en las disciplinas normativas; y en este sentido, el presente volumen comprende solamente los preliminares de una tarea más amplia y máximamente apremiante.

Si esta conjetura fuese verdadera, habría que desarrollar una materia como la ética en tres estadios relacionados entre sí: debería cons-

tituir una disciplina postulativa en la que: *a*) se adoptase un código básico, *b*) este código se desarrollase a través de sus consecuencias formales y se aplicase en la acción, y *c*) estas acciones o sus consecuencias sociales se sometiesen a prueba respecto de alguna norma de validez; y el resultado de tales pruebas solventaría la cuestión del acierto ético del código moral.

La primera reacción a esta desgraciada propuesta, aparentemente artificial, debe ser de completo escepticismo, basado en el argumento de que no existe norma objetiva alguna de validez ética: de que sólo el propio código adoptado puede conferir validez ética y de que, por consiguiente, todo el procedimiento de validación, o sea, el estadio *c*), es un trivial traslado estampillador de los resultados de un conjunto dado de postulados éticos a los postulados que engendraron estos resultados. Y esto parece anticientífico; es más, fútil.

Pero hemos de decir—y hagamos hincapié en ello—que la verificación en la ciencia no es tampoco una cuestión sencilla; es, en muchos casos, una empresa igualmente circular: para el no científico, es probable que la verificación signifique un procedimiento de mirar-y-ver, una tosca comparación de lo que *se predice* con lo que *es;* mas el análisis de los precedentes capítulos ha demostrado cuán lejos se halla de ser verdad, cuán ingenuo es suponer que un dato desnudo de la experiencia inmediata conlleva invariablemente cierta significación teorética: por el contrario, es la estructura formal de la ciencia lo que confiere relevancia a las observaciones; la teoría determina en gran medida de qué manera se expondrá a sí misma a la comprobación. Históricamente, por lo tanto la técnica de la verificación, que raramente existe antes de que nazca una teoría científica, se desarrolla juntamente con ésta y logra perfeccionarse en la misma medida que lo hace la teoría. ¿No es irrazonable, entonces, dudar de la posibilidad de verificar la teoría ética antes de intentar estructurarla en forma postulativa?

De un modo tosco, la posibilidad de verificar postulados éticos existe siempre: consiste en ver si sobrevive la sociedad que practique el código derivado de los postulados (cosa que corresponde a la ingenua tesis científica del mirar-y-ver). Del lado científico, esta tesis se ha ido refinando a medida que progresaban las teorías, y parece que la ética puede tener pocas esperanzas, a menos que emplee este mismo procedimiento, de empezar por un formalismo postulativo con plena aquiescencia y desarrollar métodos de verificación según vaya progresando.

Pero existe una dificultad aún mayor, aunque menos fundamental, en la realización de la tarea *a*), la aceptación de un código básico. Existe el importante problema de hacer que se adopte, problema que tiene su raíz en una extraña actitud práctica con respecto a los postulados éticos: en lo que a ellos se refiere, pedimos frecuentemente con irracional insistencia una evidencia *a priori,* exigimos que vengan a nosotros acreditados con una absoluta certidumbre o una sanción divina, olvidando por completo que los postulados *científicos* son inicialmente provisiona-

les, y llegan a confirmarse con el uso. Así, los postulados de la aritmética no son SEGUROS ni VERDADEROS, ya que existen muchos ejemplos de nuestra más sencilla experiencia que los violan completamente: una nube en el cielo más otra nube no siempre hacen dos nubes. Pero la ciencia lograda, válida en un enorme campo (aunque no ilimitado), ha avanzado, sin embargo, a partir de los axiomas de la aritmética; y si nos percatamos más a fondo de estos hechos, los problemas de las ciencias normativas se harán tal vez más manejables.

INDICE DE AUTORES

Abraham, 50.
Adams, N. I., 193.
Alexander, S., 158.
Anaxágoras, 18.
Aquino, Santo Tomás de, 82.
Arquímedes, 264.
Aristóteles, 38, 79, 168, 356.

Bacon, 280.
Balmer, 38.
Benjamín, 126, 158.
Bergmann, G., 227.
Bergmann, H., 382.
Bergmann, P., 158.
Bergson, 154, 158.
Berkeley, 54, 68, 83.
Bernoulli, 244.
Birge, 230.
Birkhoff, 221, 261.
Black, M., 213, 226.
Blackwood, 188.
Blake, 279.
Blanshard, 58, 59, 76.
Bohr, 23, 38, 48, 52, 149, 298, 329, 378, 382.
Boltzmann, 250, 255.
Bolyai, 131.
Born, 96, 99, 158, 300, 321, 384.
Bothe, 49.
Boyd, E., 217.
Boyle, 36.
Bridgman, 67, 99, 205, 206, 208, 215, 216, 219, 226.
Bryson, 265.
Broad, 99.
Bures, 246.
Burnside, 221.
Burr, 12, 192.
Burtt, 99, 121.
Bussey, 149.

Campbell, N., 67.
Carnap, 118, 206, 208, 211 y ss., 226. 227, 229.
Cassirer, 21, 24, 39, 63, 97, 168, 355, 382.
Chadwick, 80, 268.
Charlier, 36.
Churchman, 230.
Cleugh, 158.
Cohen, H., 104.
Cohen, M. R., 39, 226.
Compton, A., 151.
Comte, 32, 33, 34.
Condon, 349.
Copérnico, 97.
Coulomb, 34.
Cournot, 233.
Cramér, 240, 244-246.
Cusanus, 25.
Czuber, 118.

D'Abro, 58.
D'Alembert, 176.
Darwin, C. G., 58, 262, 348.
Da Vinci, 27.
De Broglie, 99, 289, 291, 298, 299 y ss., 321, 331, 350.
Davisson, 290, 298.
Deming, 119.
De Nouy, 380.
Descartes, 82, 121, 123.
Destouches, 350.
Demócrito, 77, 356.
Dewey, 21.
Dingle, 279.
Dingler, 279.
Dirac, 52, 71, 79, 88, 150, 168, 300 y ss., 309, 321, 367.
Driesch, 192.
Ducasse, 21.
Du Mond, 230.

Eddington, 23, 39, 62, 100, 106, 154, 158, 262, 279, 292.
Einstein, 23, 39, 94, 129 y ss., 155 y ss., 158, 298.
Empédocles, 18.
Engels, 30.
Epstein, 204.
Euclides, 15, 37, 129.
Euler, 43, 158.

Farber, 415.
Fechner, 38.

Fermi, 205.
Finkelstein, 265.
Frank, N., 182.
Frank, P., 356, 382.
Fry, 227.
Fourier, 48.
Fowler, 262.

Galileo, 38, 91, 94, 134, 280.
Gauss, 131.
Geffner, 119.
Geiger, 49.
Germer, 290, 298.
Gibbs, 85, 148, 235, 250 y ss., 255, 262.
Gilson, 21.
Goudsmit, 285.

Haldane, J. B. S., 31, 33.
Hamilton, 64.
Handyside, 158.
Hart, 97.
Hegel, 26, 32.
Heidegger, 265, 279.
Heisenberg, 23, 79, 96, 150, 151, 299 y ss., 321 y ss., 329 y ss.
Heitler, 92, 189, 193.
Hempel, 118, 229.
Hirth, 260.
Hoffmann, B., 81.
Holstein, 180.
Hook, 30.
Hull, C. L., 160.
Hume, 96, 376.
Husserl, 54, 58, 415.
Hutchinson, 188.
Huygens, 134.

Inglis, 182.

James, 21, 58.
Jeffreys, 233.
Jevons, 39.
Johnson, 68.
Joos, 193.
Jordán, H. J., 375.
Jordán, P., 300, 321, 367, 382.

Kant, 43, 82, 124, 138 y ss., 357, 376.
Kaufmann, F., 227.
Kaufmann, W., 289.
Kemble, 321, 340, 350.
Kennard, 348.
Kepler, 97 y ss.
Keynes, 233.
Kierkegaard, 30.
Koopmann, 261.
Kramers, 49.

Lagrange, 148, 176.
Laird, 21.
Lamb, 193.
Landé, 298.
Langevin, 33.
Laplace, 227, 233 y ss., 244.
Larmor, 188.
Le Corbeiller, 30.
Lee, 21.
Leibniz, 17, 396 y ss.
Lenin, 30.
Lenzen, 223, 383.
Lessing, 21.
Lewis, C. I., 39, 59, 76, 154, 215.
Lillie, 375.
Lindsay, R. B., 69, 100, 118, 182, 262. 381.
Lobatchevski, 131.
Locke, 53, 104.
London, 92.
Lorentz, 50, 143, 189, 285.
Lovejoy, 58, 279.
Lucrecio, 19.

Mach, 36, 51, 58, 69, 78, 100, 182, 220, 221, 224.
MacIber, 265.
MacIntosh, 76.
McLane, 221.
Margenau, 168, 192, 219, 312, 344, 401.
Mariani, 350.
Maritain, 21.
Marx, 30, 32.
Maupertuis, 176.
Maxwell, 82, 187, 188, 193, 236 y ss.
Mayer, 262.
Meiklejohn, 139.
Mendel, 407.
Meyerson, 21.
Mill, 36, 64, 226.
Millikan, 298.
Milne, 367, 383.
Minkowski, 144, 156.
Montague, 40.
More, 121, 124.
Morgan, 74.
Morris, C., 67.
Morse, P. M., 349.
Mott, 322.
Murphy, A. E., 40, 76.
Murphy, G. M., 221, 320.

Nagel, 39, 227, 246.
Natorp, 63, 76.
Neurath, O., 29.
Newton, 38, 46, 53, 68.
Northrop, 12, 40, 54, 67, 76, 128, 193.

Occam, 97.
Ogden, 226.
Oldenberg, 298.
Oppenheim, 118.

Osgood, 188.
Otto, 22.

Page, L., 182, 193.
Parménides, 15, 19, 121.
Pauli, 385 y ss., 393, 396, 401.
Pauling, 31, 322, 401.
Pearson, 36, 64, 74.
Peirce, 100.
Pfeiffer, 193.
Phelps, 15.
Planck, 23, 58, 97, 142, 205, 279, 283, 284, 290, 381.
Platón, 15, 19.
Plummer, 118.
Poincaré, 78, 79, 129 y ss., 142, 147, 155, 158, 226, 246, 362.
Price, H. H., 58.
Primakoff, 180.
Ptolomeo, 96.
Pitágoras, 37, 77.

Quine, 226.

Reiche, 298.
Reichenbach, 58, 158, 227 y ss., 246, 298, 414.
Richards, 226.
Riemann, 131.
Ritchie, 279.
Rogers, 279.
Rosenfeld, 383.
Ruark, 188, 298, 312.
Rupp, 291.
Russell, 58, 75, 84, 165.
Rutherford, 269 y ss.

St. Peter, 188.
Santayana, 40, 58, 279.
Sartre, 25.
Schelkunoff, 193.
Schilpp, 158.
Schlick, 76, 158.
Schrödinger, 50, 52, 262, 299 y ss., 312, 322, 350, 376, 400.
Scott, 188.
Seitz, 401.
Sellars, 279.
Sheldon, W. H., 22, 40.
Shewhart, 119.
Slater, 49, 182.
Smith, N. K., 100.
Smythe, 193.
Sneddon, 322.
Sorokin, 76.
Spaulding, 100.
Spemann, 192.
Spinoza, 95.
Stace, 40.
Stebbing, 40, 226.
Stranathan, 268.
Stratton, 193.
Strong, E. W., 100, 279.
Swabey, 226.
Swann, 119.

Tarski, 226.
Tartaglia, 280.
Taylor, A. E., 40.
Taylor, L. W., 298.
Thomson, G. P., 291.
Todhunter, 246.
Trefftz, 193.

Uhlenbeck, 285.
Urban, 100.
Urey, 298.
Uspensky, 227, 246.

Veblen, 149.
Venn, 246.
Von Mises, 227 y ss., 239 y ss., 246
Von Neumann, 71, 261, 313, 322, 344 y ss.
Von Weizsäcker, 76.

Wald, 119.
Walsh, 76.
Weaver, 243.
Weber, 38.
Webster, A. G., 182.
Weiss, P. (biólogo), 192.
Weiss, P. (filósofo), 40.
Weld, 226.
Werkmeister, 22, 63, 76.
Weyl, H., 23, 76, 88, 100, 158, 395, 401.
White, H. E., 48.
Whitehead, 20, 40, 76, 142.
Whittaker, 188, 193.
Wiechert, 289.
Wiener, 154, 261.
Williams, 227.
Wilson, E. B., Jr., 322, 401.
Wilson, C. T. R., 289.
Winn, 383.
Wolf, 95.
Woodger, 226.
Worthing, 119, 188.

Yukawa, 81, 103.

Zemanski, 205.
Zenón, 409.

INDICE DE MATERIAS

Abstracción, 74.
Aleatoriedad, 243.
Almagesto, 97.
Analítico, 141.
Análogos estadísticos, 250.
Año:
  anomalista, 133.
  nodal, 133.
  sideral, 132.
  tropical, 132.
A posteriori, 146.
A priori, 146.
Axioma (definición), 304.
Autofunción, 302.
Autovalor, 302.

Biología, 373.
BOHR, teoría de, 283.
BOLTZMANN, constante de, 235.

Campo:
  C, 102, 105.
  P, 102, 105, 125, 403-404.
Campos:
  biológico, 192.
  de COULOMB, 34.
  electromagnético, 178, 188.
Canje, fuerzas de, 392.
Carguícula, 292.
Caso puro, 345 y ss.
Casos equiposibles, 237.
Causa:
  parcial, 354.
  total, 354.
Causalidad, 351.
Causas, multiplicidad de, 374.
Ciencia:
  correlacional, 37.
  exacta, 159.
  normativa, 418.
  teorética, 37.
  unificada, 28.
Clásico (definición), 46.
Clasificación de las ciencias, 28.
Coeficiente de correlación, 34, 35.
Colectivo, 240.
Compatibilidad, 340.
Complementariedad, 375.
Concepto, 59-60.
  auxiliar, 51.
Conductismo, 92.
Confirmación, 101.
Conjunto, 253, 381.
Consciencia de segundo orden, 409.
Conservación, leyes de, 369.
Consistencia de la naturaleza, 81.
Constitutivo (definición), 216 y ss.
Construcciones interpretativas, 71 y siguientes, 77.
  ampliabilidad de las, 91.
  estabilidad de las, 89.
  permanencia de las, 89.
Contador Geiger, 288.
Continuo, 183.
CORIOLIS, fuerza de, 367.
Correlación, coeficiente de, 34, 35.
  epistémica, 72.
Correspondencia, reglas de, 64, 72, 77, 101.
Cosa, aspecto de, 16.
Cosificación, 64, 65, 66, 68.
Cronon, 149 y ss.
Cualidades:
  primaria, 18.
  secundaria, 18.
Cuantos:
  teoría de los, 39.
Cuasifuerzas, 390.
Cuerpos rígidos, 181.

Dado, lo, 40.
Datos, 59, 271.
  de los sentidos, 54.
Definiciones, 206.
  constitutivas, 216 y ss., 219.
  epistémicas, 216 y ss., 219.
Demonio, 357.
Depresión, 354.
Descripción, 159.
Desviación típica, 326.
Difracción, 286.
Dimensiones, 130, 146, 156, 170.
  físicas, 218.
Dinámica cuántica, 318.
Ding an sich, 20, 53.

Distribución:
canónica, 253.
gaussiana, 111.
Dualismo, 285.

Efecto:
Compton, 288.
Doppler, 342.
fotoeléctrico, 287.
Efectos cooperativos, 392.
Eficaz, lo, 20.
Ego, 42, 408.
Elan vital, 123.
Electrodinámica, 187.
Electrones, cañón de, 294.
Electrostática, 190.
Elegancia, 96.
Elemento lineal, 135.
Elementos, 18.
Empírico (definición), 51.
Empirismo, 95.
británico, 90.
Enciclopedistas, 28.
Entropía, 201.
Epiciclos, 97.
Epistémico (definición), 216 y ss.
Epistemología, 82, 404.
Error, 108.
medio geométrico, 110.
normal, 109.
probable, 110.
promedio, 110.
Escolasticismo, 27.
Espacio, 43.
absoluto, 146.
conceptual, 134.
euclidiano, 75, 136.
no euclidiano, 136.
psicológico, 126.
relacional, 146.
riemanniano, 75.
Espectador, 42, 43, 52.
Espirácula, 292.
Estado, 159 y ss., 163, 165.
ecuación de, 195.
estacionario, 318.
macroscópico, 256.
microscópico, 256.
variable de, 199.
Estática cuántica, 318.
Eter, 16, 20, 188.
EULER, ecuaciones de, 175.
Exclusión, principio de, 87, 384 y ss.
Experiencia, definición de, 51.
Explicación, 34, 159 y ss.

Fase, 179, 194.
espacio de, 252.
Fertilidad lógica, 83.
Filosofía existencial, 16, 25, 411.
Finalidad, 422.
Flogisto, 15, 20.
Fluxiones, 103.
Fotón, 287.
Fuerza (definición), 209 y ss.
de dos cuerpos, 178.
Función, 300.
de GAUSS, 314 y ss.
delta, 309.
hamiltoniana, 150.
lagrangiana, 175.
propia, 302.
simétrica, 388.

GAUSS, función de, 314 y ss.
Geometría:
euclidiana, 136.
no euclidiana, 136.
Gravitación, 161.
universal, 362.
Grenzbegriff, 127.
Grupo, 147.

Hedonismo, 417.
Hidrógeno, átomo de, 386.
Hipótesis ptolomeica, 408.
Hodon, 149 y ss.
Humanidades, 26, 38.
HUYGENS, principio de, 188.

Identidad:
de electrones, 395.
de indiscernibles, 396.
Ignorancia, 258.
Impulso, 314.
Incertidumbre, principio de, 45, 323.
Indeterminismo, 361.
Indiferencia, principio de, 239.
Inferencia, 229.
Intercambio, fuerzas de, 392.
Interferencia, 286.
Intuible (definición), 298.
Invariancia, 144.

Korrespondenzmässig, 280.

Libertad, grado de, 170, 256.
Límite estocástico, 114.
Localizabilidad, 122.
Lógica:
aristotélica, 84.
de muchos valores, 84.
Longitud de onda de COMPTON, 151.

Magnitud, 165.
Masa, 43, 68, 224.
Materia, 42.
Matriz:
elemental, 346.
estadística, 345.

mecánica de, 299.
S, 158.
Medición, 335.
Mecánica:
cuántica, 299.
estadística, 247.
newtoniana, 18.
ondulatoria, 299.
MENDEL, leyes de, 160, 237.
Mesones, 80, 103.
Metafísica, 23, 77, 80, 82, 92, 403.
Métrica, 135 y ss.
Mezcla, 345.
Mirabilis jalapa, 407.
Modelos, 79.
Momento, 314.
Monocromador, 339.
Movimiento:
constante del, 173, 190.
ecuación del, 172.
ley de, 171.
Muerte térmica, 259.

Naturaleza, 68, 86, 102, 104.
Neutrón, 268.
Nirvana, 65.
Nucleón, 81.
Número, 275.
Números cuánticos, 283, 386.

Objetividad, 64.
Observables, 167 y ss., 163, 166, 303.
latentes, 166 y ss.
poseídos, 166 y ss.
Ondas, paquete de, 320.
Ondícula, 292.
Ontología, 82.
Operador, 301 y ss.
hermético, 305.
Organización, 396.

Pares canónicamente conjugados, 327.
Parvus mundus, 25.
Percepto, 60, 61.
Permanencia, 89.
Plano *P*, 102, 105, 125, 403, 404.
Polarización, 286.
Positivismo lógico, 61.
Positivistas, 30.
Precisión, medidas de, 108, 110.
Principio:
de FERMAT, 176.
de HAMILTON, 175, 176.
integral, 174.
de menor acción, 176.
del ser, 15.
Probabilidad, 227.
a posteriori, 234.
a priori, 234.
agregado de, 239.

Problema de muchos cuerpos, 375.
Providencia, 78.

Rayos X, 288.
Realidad:
histórica, 405.
primaria, 413.

Reciprocidad, 384.
Rechengrössen, 51.
Reglas de correspondencia, 64, 72 y ss., 306.
Relación inversa, 26.
Relatividad, 31, 91, 137 y ss., 148, 368
Res cogitans, 17.
Res publica, 17.
Reversibilidad, 153.

Schrödinger, ecuación de, 299, 319.
Sencillez, 96.
Ser, principio del, 15.
Simultaneidad, 31, 145.
Sintético, 140.
Sistema, 159 y ss., 163.
cerrado, 359 y ss.
inercial, 91.
Subjetivo-objetivo, 69.
Substancia, 184.

Teleología, 380.
Tensión, 185.
Termodinámica, 194.
leyes de la, 198, 200.
Tiempo, 43, 120.
conceptual, 134.
en dos direcciones, 152.
solar medio, 133.
unidades de, 132.
Transcendentalismo, 63.

Universales, 277.

Valencia, 92, 160.
Valor propio, 302.
Valores, 415.
Verdad, 14.
Verifacto, definición de, 73, 98.
Viena, círculo de, 36.
Vinculaciones:
epistémicas, 85.
formales, 85.
múltiples, 85, 86.
Vitalismo, 92.

Wesensschau, 415.

Yoes, 271, 408.

OTRAS PUBLICACIONES DE EDITORIAL TECNOS

Serie de
FILOSOFIA Y ENSAYO

ABELLÁN, José Luis: *Miguel de Unamuno a la luz de la psicología.* Una interpretación de Unamuno, desde la psicología individual.

ABELLÁN, José Luis: *Ortega y Gasset en la filosofía española.* Ensayos de apreciación.

DÍAZ, Elías: *Revisión de Unamuno.* Análisis crítico de su pensamiento político.

DOPP, Joseph: *Nociones de lógica formal.*

ENJUTO BERNAL, Jorge: *La filosofía de Alfred North Whitehead.*

FERNÁNDEZ DE CASTILLEJO, José Luis: *Actualidad y participación.* Una filosofía contemporánea.

GARCÍA SAN MIGUEL, Luis: *Notas para una crítica de la razón jurídica.*

GURMÉNDEZ, Carlos: *Ser para no ser.* Ensayo de una dialéctica subjetiva.

HUGHES, John B.: *José Cadalso y las "Cartas Marruecas".*

MARTÍN SANTOS, Luis, y otros: *Ensayos de filosofía de la ciencia.* Simposio de Burgos en torno a la obra de Karl R. Popper.

MATES, Benson: *Lógica matemática elemental.*

NICOL, Eduardo: *El problema de la filosofía hispánica.*

NICOL, Eduardo: *Historicismo y existencialismo.* (2.ª ed.)

PARÍS, Carlos: *Hombre y Naturaleza.*

RAMA, Carlos M.: *Teoría de la historia.* Introducción a los estudios históricos. (2.ª ed.)

SÁNCHEZ DE LA TORRE, Angel: *Los griegos y el Derecho natural.*

SOTELO, Ignacio: *Sartre y la razón dialéctica.*

TIERNO GALVÁN, Enrique: *Acotaciones a la historia de la cultura occidental en la Edad Moderna.*

TIERNO GALVÁN, Enrique: *Razón mecánica y razón dialéctica.*

OTRAS PUBLICACIONES
DE
EDITORIAL TECNOS

RES PUBLICA

HOBBES, Thomas: *Antología. (Del Ciudadano. Leviatán.)* Estudio preliminar de E. Tierno Galván.

MACKENZIE BROWN, D.: *La Sombrilla Blanca. El Pensamiento Político Hindú desde Manú a Gandhi.*

SPINOZA, Baruch: *Tratado Teológico-Político. Tratado Político.* Estudio preliminar de E. Tierno Galván.

STUART MILL, John: *Libertad. Gobierno Representativo. Esclavitud Femenina.* Estudio preliminar de Pablo Lucas Verdú.

UNAMUNO, Miguel de: *Pensamiento Político.* Selección de textos y Estudio preliminar, por Elías Díaz.

HISTORIA

BRAUDEL, Fernand: *Las Civilizaciones Actuales.* Estudio de la historia económica y social.

SOBOUL, Albert: *Compendio de la historia de la Revolución Francesa.*

TIERNO GALVÁN, Enrique: *Baboeuf y los Iguales.* Un episodio del Socialismo premarxista.

TUÑÓN DE LARA, Manuel: *Medio siglo de Cultura Española (1885-1936).*